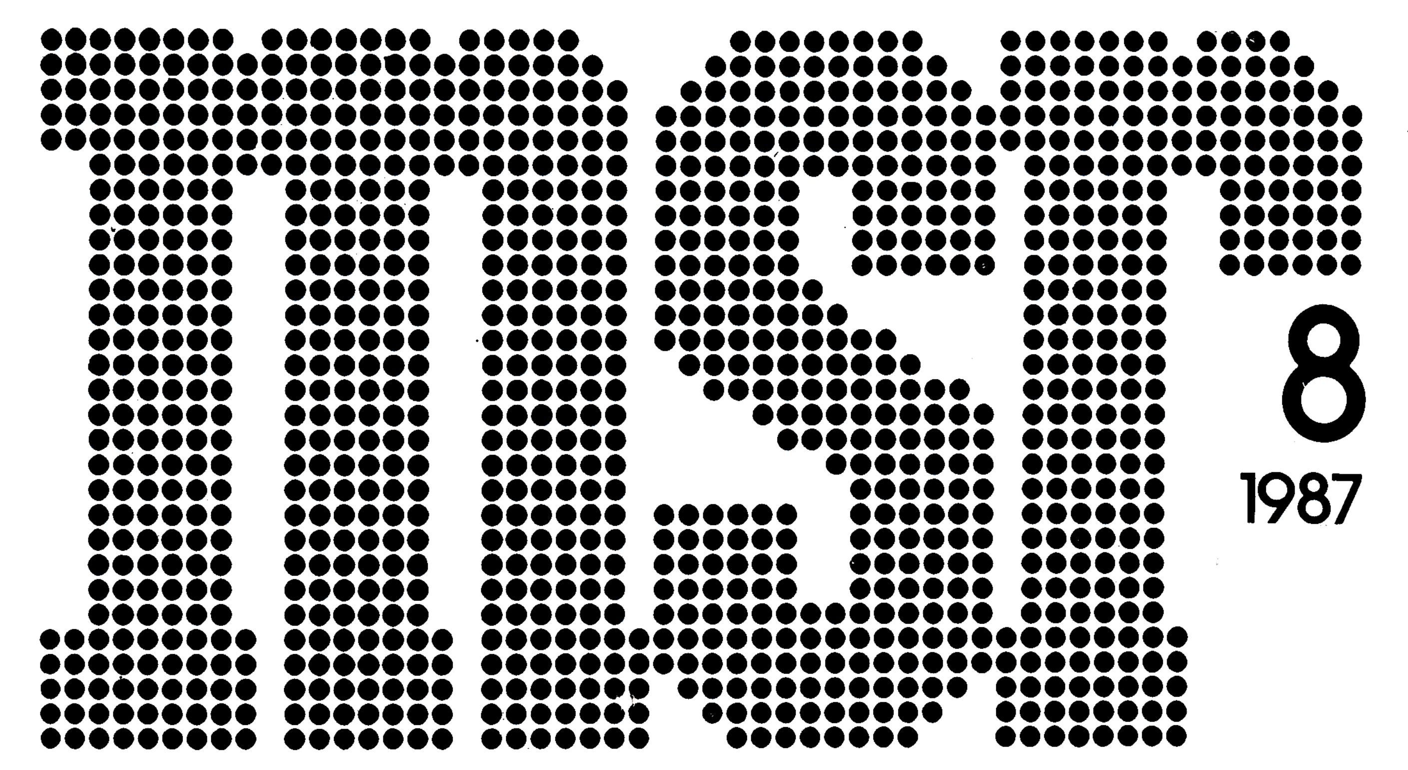


messen · steuern · regeln

Ruderwinkel
10°
0°
-10°

Kurswinkel
20°
10°
0°
-10°



VEB
Verlag Technik
Berlin
EVP: 4,- M

Im Blickpunkt:

6. Arbeitstagung „Algorithmisierte Prozeßanalyse“

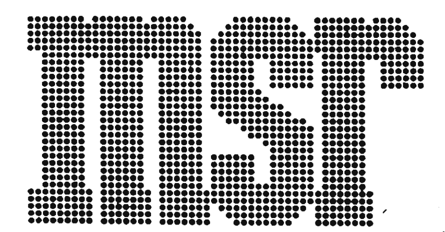
Am 28. und 29. September 1987 findet in Dresden die 6. Arbeitstagung „Algorithmisierte Prozeßanalyse“ statt. Sie wird vom Zentralinstitut für Kybernetik und Informationsprozesse der Akademie der Wissenschaften der DDR in Zusammenarbeit mit dem Fachunterausschuß „Prozeßanalyse und Modellbildung“ der WGMA sowie der Arbeitsgruppe „Regelungssysteme“ des Kooperationsrates „Technische Kybernetik“ veranstaltet. Damit findet eine gute Tradition ihre Fortsetzung, wonach im Abstand von drei Jahren die Fachleute aus den Akademieinstituten, den Hoch- und Fachschulen sowie der Industrie in Dresden zu einem gemeinsamen Erfahrungsaustausch zusammenkommen, um die in den zurückliegenden Jahren entwickelten neuen Verfahren und ihre geräte- bzw. rechentechnische Umsetzung vorzustellen sowie die möglichen Entwicklungsrichtungen auf diesem Fachgebiet zu diskutieren.
Die erste Arbeitstagung fand im Jahre 1971 in Dresden statt. Auf ihr wurden vor allem Verfahren zur Ermittlung nichtparametrischer Modelle in Form von Gewichtsfunktionen, Übergangsfunktionen und Frequenzgängen sowie deren gerätemäßige Realisierung für einvariable, gestörte Regelstrecken und Verfahren zur Signalanalyse vorgestellt. Damit fanden die in der Mitte der 60er Jahre begonnenen Forschungsarbeiten ihren Abschluß.
Zu Beginn der 70er Jahre verlagerte sich aufgrund des verstärkten Einsatzes von Prozeßrechnern zur Automatisierung technischer Prozesse der Schwerpunkt der Forschungsaufgaben auf die Entwicklung von Parameterschätzverfahren zur On-line-Ermittlung parametrischer Modelle für einvariable gestörte Regelstrecken. Diese Problematik stand deshalb im Mittelpunkt der zweiten Arbeitstagung, die im Jahre 1974 durchgeführt wurde.
In der Mitte der 70er Jahre fand der Übergang zur Untersuchung mehrvariabler Regelstrecken und der Modellermittlung für den geschlossenen Regelkreis statt. Damit traten erstmals die Probleme der Strukturermittlung für mehrvariable Regelstrecken und der Identifizierbarkeit in geschlossenen Systemen auf. Sie bildeten auch die Schwerpunkte der dritten Arbeitstagung im Jahre 1978.
In den folgenden Jahren wurde weiter intensiv an der Entwicklung und Erprobung von Identifikationsverfahren für mehrvariable, geschlossene Systeme gearbeitet. Gleichzeitig wurden für den verstärkten Einsatz in der Industrie und auch in der Lehre zahlreiche Programmpakete für die System- und Signalanalyse entwickelt. Diese sowie die theoretischen Weiterentwicklungen bei der Strukturermittlung sowie der Identifizierbarkeit bildeten die Schwerpunkte auf der vierten Arbeitstagung im Jahre 1981.
Während die bis dahin entwickelten Identifikationsverfahren für die Modellbildung vorwiegend zum Entwurf von Basissteuerungen auf der prozeßnahen Ebene entwickelt wurden, trat zu Beginn der 80er Jahre der Übergang zur Untersuchung komplexer und sog. großer Systeme auf. Hier wurde zunächst versucht, die bereits bekannten Methoden zur Identifikation der Teilsysteme und der Störsignale anzuwenden. Dabei zeigte es sich, daß neue Modellformen und entsprechende Identifikationsverfahren notwendig sind. Erste Untersuchungsergebnisse und die dabei aufgetretenen Probleme wurden auf der fünften Arbeitstagung im Jahre 1984 vorgestellt.
Gegenwärtig bildet die Entwicklung von System- und Signalmodellen für die Prozeßsicherung, Prozeßüberwachung und operative Lenkung komplexer volkswirtschaftlicher Systeme einen wesentlichen Forschungsschwerpunkt. Hier finden teils bekannte Verfahren einen neuen Anwendungsbereich, teils müssen neue Verfahren entwickelt werden. Sie bilden die Basis von Ratgeberbausteinen für Dispatchersteuerungen sowie zur Überwachung und Sicherung sehr komplexer Systeme. Einen weiteren Forschungsschwerpunkt bildet die rechentechnische Umsetzung der bereits bekannten Identifikationsverfahren auf Klein- und Mikrorechner in Form von CAD-Bausteinen vor allem für die breitere Anwendung von adaptiven Basisregelungen. Im Mittelpunkt der sechsten Arbeitstagung stehen deshalb:

- die Prozeßanalyse für die operative Lenkung und Entscheidungsfindung
- die System- und Signalanalyse mit Hilfe von Klein- und Mikrorechnern.

Die ausführlichen Fassungen ausgewählter Beiträge werden in diesem Heft der msr veröffentlicht, das gemeinsam mit einer Ausgabe der ZKI-Informationen als Tagungsmaterial dient.
Wir hoffen, daß auch die sechste Arbeitstagung zu einem fruchtbaren Erfahrungsaustausch zwischen den Teilnehmern und zur Weiterentwicklung auf diesem für die effektive Beherrschung komplexer Systeme wichtigen Fachgebiete beitragen wird.

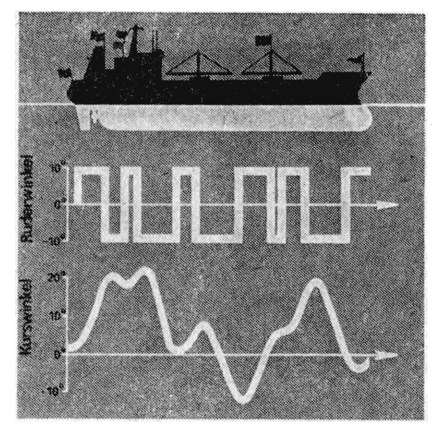
Dr. sc. techn. *H.-H. Wilfert* und Dr. sc. techn. *G. Bretthauer*, Akademie der Wissenschaften der DDR, Zentralinstitut für Kybernetik und Informationsprozesse.

msr 8726



messen·steuern·regeln

Wissenschaftlich-technische Zeitschrift für die Automatisierungstechnik

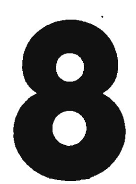


In unserem Beitrag auf S. 353 werden Identifikationsmethoden zur Ermittlung parametrischer, linearer Modelle für das Bewegungsverhalten von Schiffen beschrieben. Unser Titelbild vermittelt den Zusammenhang zwischen einer PRBS-Testsignalfolge als Ruderwinkel und dem Kurswinkel des Schiffes als Reaktion. Dem Themenkomplex Identifikation ist dieses Schwerpunktheft zur 6. Arbeitstagung „Algorithmisierte Prozeßanalyse" gewidmet.

Titelgrafik: *G. Schwesinger*

Herausgeber:

Wissenschaftlich-Technische Gesellschaft für Meß- und Automatisierungstechnik (WGMA) in der KDT



30. Jahrgang
August 1987

VEB
VERLAG TECHNIK

AUFSÄTZE

ISSN 0026-0347

J. Fischer; H.-H. Wilfert

Probleme und Methoden bei der Anwendung von Stackelberg-Strategien zur Steuerung komplexer Systeme mit hierarchischer Entscheidungsstruktur (Teil 1)

0. Einleitung

Zunehmendes Interesse richtet sich auf die Anwendung spieltheoretischer Ansätze zur Lösung ökonomischer und technischer Problemstellungen. Die Grundlage dafür bietet die Vielfalt der Erkenntnisse und verallgemeinernden Aussagen, durch die die Spieltheorie seit den grundlegenden Arbeiten *J. v. Neumanns* [36] und [37] bereichert wurde. Aus der Fülle der theoretisch und anwendungsorientierten Publikationen soll im Rahmen der folgenden Betrachtungen der Modellansatz im Sinne von *Stackelberg* [45] hervorgehoben werden. Seine realitätsbezogene Anwendung zur Entscheidungsfindung bei der Steuerung komplexer Systeme wird begünstigt, falls bereits eine hierarchische Entscheidungsstruktur vorliegt. Der zu steuernde Prozeß selbst muß dabei nicht unbedingt eine hierarchische Systemstruktur aufweisen.
Ausgehend von der Zielsetzung, die prinzipiellen Möglichkeiten der Anwendung von Stackelberg-Strategien für die Prozeßsteuerung zu zeigen, ist der Beitrag wie folgt gegliedert:
Der erste Abschnitt dient der Einordnung des Stackelberg-Konzepts in die Fragestellungen der Spieltheorie und der Motivierung für die Wahl von Stackelberg-Strategien. Der zweite Abschnitt enthält eine Reihe von Grundbegriffen und Grundaussagen über die Eigenschaften von Stackelberg-Lösungen. Der dritte Abschnitt zeigt Wege zur Bestimmung von Closed-loop-Stackelberg-Strategien. Abschnitt 4. skizziert bekanntgewordene Anwendungen. Der letzte Abschnitt behandelt einige weiterführende Aspekte.

1. Einordnung in die Spieltheorie und Motivierung

Ausgegangen wird von einem Grundmodell mit mehreren Entscheidungsträgern, den sogenannten Spielern. Jeder Spieler sucht seine Zielfunktion zu optimieren, wobei das Ergebnis nicht nur von seiner Entscheidung, sondern auch von denen seiner Mitspieler abhängen soll. Dabei können folgende prinzipielle Verhaltensweisen unterschieden werden:
Im Fall, daß die Beteiligten nur eine gemeinsame Zielfunktion haben und ihre Entscheidungen kooperativ mit dem Ziel der Optimierung ihrer identischen Zielfunktionen wählen, handelt es sich um ein Teamproblem. Unterschiedliche Zielfunktionen der einzelnen Spieler und Ausschluß von Koalitionsabsprachen charakterisieren die Gruppe der nichtkooperativen Spiele. Im einfachsten Fall vollständig entgegengesetzter Interessen entspricht der Gewinn des einen Spielers dem Verlust der anderen Spieler und umgekehrt. Es handelt sich dann um ein sogenanntes Nullsummen- oder Konstantsummenspiel, andernfalls um ein Nichtnullsummenspiel. Nur letztere sollen im folgenden betrachtet werden.
Unter der Voraussetzung völliger Gleichberechtigung der Spieler sind in einem Nichtnullsummenspiel zwei extreme Spielstrategien möglich, die am Beispiel eines Zweipersonenspiels erläutert werden sollen.

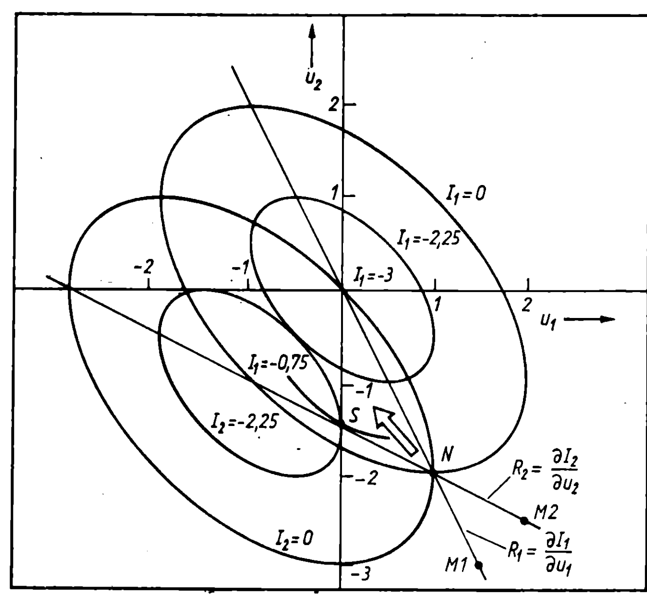


Bild. Minimax-, Nash- und Stackelberg-Lösung für ein statisches Zweipersonenspiel

$I_F = I_1(u_1, u_2) = u_1^2 + u_1u_2 + u_2^2 - 3$

$I_M = I_2(u_1, u_2) = u_1^2 + u_1u_2 + u_2^2 + 3u_1 + 3u_2$

$-3 \leq u_1 \leq 2; \; -3 \leq u_2 \leq 2$

M1: $\min\limits_{u_2} \max\limits_{u_1} I_1(u_1, u_2) = 0{,}75$ für $u_1 = 1{,}5$, $u_2 = -3$;

M2: $\min\limits_{u_1} \max\limits_{u_2} I_2(u_1, u_2) = 3{,}75$ für $u_1 = 2$, $u_2 = -2{,}5$;

N: $\left.\begin{array}{l} I_1^N(u_1^N, u_2^N) = 0 \\ I_2^N(u_1^N, u_2^N) = 0 \end{array}\right\} u_1^N = 1, u_2^N = -2;$

S: $\left.\begin{array}{l} I_1^S(u_1^S, u_2^S) = -0{,}75 \\ I_2^S(u_1^S, u_2^S) = -2{,}25 \end{array}\right\} u_1^S = 0, u_2^S = -1{,}5$

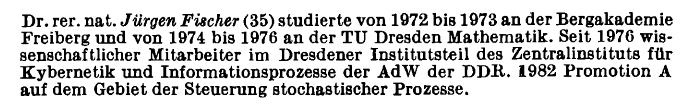
Die Spieler setzen voraus, daß der Gegenspieler versucht, durch seine Entscheidung die für den anderen Spieler ungünstigste Lösung zu erreichen. Folglich muß er bestrebt sein, diesen vom Gegner angestrebten maximalen Verlust durch seine Entscheidung zu minimieren. Diese pessimistische Annahme führt auf eine Minimax-Strategie.
Bezeichnen u_1 und u_2 die unterschiedlichen Entscheidungsvariablen der Spieler und $I_1(u_1, u_2)$ und $I_2(u_1, u_2)$ ihre jeweiligen Zielkriterien, so gilt für eine Minimax-Strategie der Spieler

$$\min_{u_1} \max_{u_2} I_1(u_1, u_2) \tag{1a}$$

bzw.

$$\min_{u_2} \max_{u_1} I_2(u_1, u_2)\,. \tag{1b}$$

(1) zeigt, daß zur Realisierung einer Minimax-Strategie jeder Spieler nur sein eigenes Gütekriterium und dessen Abhängigkeit von den Entscheidungen des Gegners kennen muß.


Dr. rer. nat. *Jürgen Fischer* (35) studierte von 1972 bis 1973 an der Bergakademie Freiberg und von 1974 bis 1976 an der TU Dresden Mathematik. Seit 1976 wissenschaftlicher Mitarbeiter im Dresdener Institutsteil des Zentralinstituts für Kybernetik und Informationsprozesse der AdW der DDR. 1982 Promotion A auf dem Gebiet der Steuerung stochastischer Prozesse.

Dr. sc. techn. *Hans-Helmut Wilfert* (50) studierte von 1954 bis 1960 Elektrotechnik an der TH Dresden. Anschließend bis 1963 am Institut für Regelungstechnik der TU Dresden tätig. Seit 1963 im Dresdener Institutsteil des Zentralinstituts für Kybernetik und Informationsprozesse der AdW der DDR, dort wissenschaftlicher Abteilungsleiter. 1967 Promotion A, 1971 Promotion B, jeweils an der TU Dresden.

Das Bild veranschaulicht am Beispiel quadratischer Gütefunktionen mit beschränktem Entscheidungsraum die beiden Minimaxlösungen.
Ein mehr rationales Verhalten der Spieler besteht darin, ihr eigenes Zielkriterium zu minimieren und vorauszusetzen, daß auch der Gegenspieler eine solche Strategie verfolgt. Existiert eine Lösung $u_1 = u_1^N$ und $u_2 = u_2^N$ mit den Eigenschaften

$$I_1(u_1^N, u_2^N) \leqq I_1(u_1, u_2^N), \quad \forall u_1, \tag{2a}$$

$$I_2(u_1^N, u_2^N) \leqq I_2(u_1^N, u_2), \quad \forall u_2, \tag{2b}$$

so wird die Lösung als Nash-Punkt [35] bezeichnet. Ein einseitiges Abweichen eines Spielers von der so definierten Nash-Gleichgewichtslösung (NGGL) erhöht den Verlust des Spielers und schützt so den anderen vor dem Versuch, die eigenen Verluste auf Kosten des anderen zu verringern. Die NGGL kann von den Spielern bei vollständiger Kenntnis des Gütekriteriums des anderen erreicht werden.
Die rationalen Reaktionen der Spieler sind durch die Wahl von

$$u_1^R(u_2) = \arg\min_{u_1} I_1(u_1, u_2) \tag{3a}$$

und

$$u_2^R(u_1) = \arg\min_{u_2} I_2(u_1, u_2) \tag{3b}$$

charakterisiert (Bild 1). Dabei bedeutet der Ausdruck arg min

$$\arg\min_u f(u) = u_0, \quad \text{falls} \quad f(u_0) = \min_u f(u). \tag{3c}$$

Die Schnittpunkte beider Kurven sind Nash-Gleichsgewichtslösungen.
Gegen die Anwendung einer Nash-Strategie sprechen folgende Argumente:
Häufig ist die für ein Nash-Spiel vorausgesetzte vollständige wechselweise Information über die Zielfunktion des Gegenspielers nicht vorhanden. In einer Reihe praktisch interessierender Fälle existiert bei ausschließlicher Verwendung deterministischer (reiner) Strategien keine NGGL. In anderen Fällen treten mehrere NGGL auf, so daß eine zusätzliche Einigung erforderlich wird. Weiterhin existieren unter Umständen für beide Spieler wesentlich günstigere Lösungen im Entscheidungsraum (Pfeil im Beispiel im Bild).
Die genannten Probleme motivieren dazu, die gleichberechtigte Stellung der beiden Spieler aufzuheben und durch einen übergeordneten Spieler (Spielführer) einen nach den Gesamtinteressen ausgerichteten Spielverlauf zu erzwingen. Eine mögliche Strategie mit dieser Zielsetzung ist die sogenannte Stackelberg-Strategie [20]. Bei ihr gibt der Spielführer (Leader) seine Strategie als erster bekannt, während seine Mitspieler (Follower) auf der Basis dieser Vorgabe mit einer rationalen Entscheidung im Sinne der Minimierung ihres eigenen Gütekriteriums reagieren. Die Realisierung einer solchen Strategie setzt die zumindest teilweise Kenntnis der Gütekriterien der Mitspieler durch den Spielführer voraus, damit er eine in seinem Sinne optimale Strategie vorgeben kann.
Werden im weiteren der Spieler 1 als Spielführer (F) und der Mitspieler mit (M) bezeichnet, so wird eine Stackelberg-Strategie durch folgendes Strategienpaar charakterisiert:
— Für den Spielführer

$$u_F^* = \arg\min_{u_F} I_F(u_F, u_M^R(u_F)) \tag{4a}$$

— Für den Mitspieler

$$u_M^* = u_M^R(u_F^*) = \arg\min_{u_M} I_M(u_F^*, u_M). \tag{4b}$$

Bild 1 zeigt mit S als Stackelberg-Lösung den Unterschied zur Nash-Lösung. Sie ist in diesem Fall für beide Spieler vorteilhafter als die NGGL.
Die Stackelberg-Lösung stellt somit einen für den Spielführer vorteilhaften Kompromiß zwischen seiner Zielfunktion und denen seiner Mitspieler dar.
Hat der Spielführer die Möglichkeit, seine angekündigte Strategie erst als zweiter zu realisieren (reversed Stackelberg game) [25], so kann er durch geeignete Wahl seiner Strategie in Abhängigkeit von der Entscheidung des Mitspielers entsprechend

$$u_F = \gamma_F^*(u_M) \tag{5}$$

im Idealfall das Optimum seiner eigenen Zielfunktion erzwingen. Dies ist der Fall, wenn die daraus resultierende rationale Strategie u_M^* des Mitspielers

$$u_M^* = \arg\min_{u_M} I_M(\gamma_F^*(u_M), u_M) \tag{6}$$

zur Minimierung des Gütefunktionals des Spielführers führt, also

$$(u_F^*, u_M^*) = \arg\min_{(u_F, u_M)} I_F(u_F, u_M) \tag{7}$$

mit

$$u_F^* = \gamma_F^*(u_M^*) \tag{8}$$

gilt.
Mit der Wahl und Durchsetzung der Strategie γ_F^* durch den Spielführer wird für den Mitspieler ein Anreiz geschaffen, im Sinne des Spielführers zu wirken (incentive problem) [26]. Für das im Bild 1 betrachtete Beispiel ergibt sich mit

$$u_F = \gamma_F^*(u_M) = -u_M$$

das Minimum der Zielfunktion des Spielführers

$$I_F(u_F^*, u_M^*) = -3$$

im Vergleich zur Stackelberg-Lösung mit $I_F = -0{,}75$. Diese Lösung ist die optimale Teamlösung für das Zielkriterium des Spielführers.

2. Eigenschaften von Stackelberg-Lösungen und Grundaussagen zu Stackelberg-Strategien

Die bisherige Betrachtung wird im folgenden auf zeitdiskrete deterministische dynamische Spiele erweitert. Im Gegensatz zu den statischen Spielen beschreiben diese einen Spielverlauf, bei dem mindestens ein Spieler unter Nutzung der Kenntnis vorausgegangener Entscheidungen und des erreichten Spielstandes handelt.
Im weiteren wird unter „Spiel" die Aufgabe verstanden, einen Prozeß

$$\boldsymbol{x}(k+1) = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}(k), \boldsymbol{u}_F(k), \boldsymbol{u}_M(k), k), \quad k = 0, 1, \ldots, N-1 \tag{9}$$

aufgrund der den beiden Spielern jeweils zugänglichen Beobachtungen

$$\boldsymbol{y}_F(k) = \boldsymbol{h}_F(\boldsymbol{x}(k), k) \tag{10}$$

bzw.

$$\boldsymbol{y}_M(k) = \boldsymbol{h}_M(\boldsymbol{x}(k), k) \tag{11}$$

so zu steuern, daß die Verlustfunktionen der Spieler $I_F(\boldsymbol{u}_F, \boldsymbol{u}_M)$ und $I_M(\boldsymbol{u}_F, \boldsymbol{u}_M)$ minimal werden. $\boldsymbol{x}(.)$ bezeichnet dabei den Systemzustand. Die Verlustfunktionen der Spieler werden zur Vereinfachung in Form additiver Schrittkosten entsprechend

$$I_.(\boldsymbol{u}_F, \boldsymbol{u}_M) = \sum_{k=0}^{N-1} g_.(\boldsymbol{x}(k+1), \boldsymbol{x}(k), \boldsymbol{u}_F(k), \boldsymbol{u}_M(k), k) \tag{12}$$

vorausgesetzt (Der Punkt bezeichnet Index F oder M).
Die Elemente der Steuerungsfolgen $\boldsymbol{u}_F$ und $\boldsymbol{u}_M$ mit

$$\boldsymbol{u}_F = (\boldsymbol{u}_F(0), \boldsymbol{u}_F(1), \ldots, \boldsymbol{u}_F(N-1)) \tag{13}$$

und

$$\boldsymbol{u}_M = (\boldsymbol{u}_M(0), \boldsymbol{u}_M(1), \ldots, \boldsymbol{u}_M(N-1)) \tag{14}$$

werden auf der Grundlage der Zustandsbeobachtungen und bereits erfolgter Entscheidungen (Steuerungen) gewählt. Die den einzelnen Spielern zugänglichen Kenntnisse über $\boldsymbol{u}_F(k)$, $\boldsymbol{u}_M(k)$, $\boldsymbol{y}_F(k)$, $\boldsymbol{y}_M(k)$ werden als Informationsstruktur bezeichnet. Sie kann als Teilmenge der maximal möglichen Informationsmenge

$$\begin{aligned} \boldsymbol{I}(k) = \{&\boldsymbol{y}_F(0), \ldots, \boldsymbol{y}_F(k), \boldsymbol{y}_M(0), \ldots, \boldsymbol{y}_M(k-1), \boldsymbol{u}_F(0), \\ &\ldots, \boldsymbol{u}_F(k-1), \boldsymbol{u}_M(0), \ldots, \boldsymbol{u}_M(k-1)\} \end{aligned} \tag{15}$$

aufgefaßt werden.
Die dem Mitspieler zugängliche Informationsmenge kann dabei als Teilmenge in der dem Spielführer zugänglichen Informationsmenge enthalten sein (nested case), oder der Mitspieler hat private Informationen, die der Spielführer nicht hat (nonnested case) [23]. In Abhängigkeit von der jeweiligen Informationsstruktur ist die Realisierung unterschiedlicher Spielstrategien (Steuerungsfolgen) möglich, wobei nicht immer alle beim jeweiligen Spieler vorhandenen Informationen auch genutzt werden.

Steuerungen, die nur vom Anfangszustand und der Zeit sowie den bisher vom Spieler selbst getroffenen Entscheidungen abhängen, werden als offene Steuerungen (open loop strategy) bezeichnet. Die jeweilige Informationsstruktur ist dann für den Spielführer

$$\boldsymbol{I}_{\mathrm{F}}(k) = \{\boldsymbol{x}(0), \boldsymbol{u}_{\mathrm{F}}(0), \dots, \boldsymbol{u}_{\mathrm{F}}(k-1)\} \quad (16)$$

und für den Mitspieler

$$\boldsymbol{I}_{\mathrm{M}}(k) = \{\boldsymbol{x}(0), \boldsymbol{u}_{\mathrm{M}}(0), \dots, \boldsymbol{u}_{\mathrm{M}}(k-1)\} . \quad (17)$$

Bei einer Abhängigkeit der gewählten Steuerungsstrategie vom bisherigen Spielverlauf spricht man von einer geschlossenen Steuerung (closed loop strategy), wobei je nach der vorliegenden Informationsstruktur sehr unterschiedliche Spielstrategien verwirklicht werden können. Die Informationsstrukturen können sich z. B. durch unterschiedliche Informationen über die Züge des anderen Spielers bzw. über den Zeithorizont, über den die Information vorhanden ist, unterscheiden.

Wie an Beispielen gezeigt werden kann, gilt für die Bestimmung optimaler Closed-loop-Stackelberg-Strategien das Optimalitätsprinzip nicht [43]. Strategien, die trotzdem mittels der dynamischen Optimierung berechnet wurden, werden zur Unterscheidung von den „globalen" Closed-loop-Stackelberg-Strategien als Feedback-Stackelberg-Strategien bezeichnet.

Untersuchungen zur Existenz von Stackelberg-Strategien zeigen, daß diese bereits unter im Vergleich zum Nash-Konzept schwächeren Voraussetzungen existieren. So gibt es bereits in der Klasse der reinen Strategien für jedes endliche Spiel (Spiele mit endlicher Strategiemenge) eine Stackelberg-Lösung. Ist die rationale Reaktion des Mitspielers für jede Strategie des Spielführers eindeutig, resultiert ein Spielausgang, der sichert, daß im Vergleich zur Nash-Strategie zumindest für den Spielführer keine höheren Verluste auftreten. Dies gilt auch für unendliche Spiele, falls für diese konvergente Approximationen durch endliche Spiele existieren und sich die Bestimmung optimaler Strategien auf eine punktweise Minimierung reduzieren läßt. Beispielsweise werden für die Existenz von Open-loop-Strategien im Fall dynamischer Spiele abgeschlossene beschränkte (kompakte) Entscheidungsmengen ($\boldsymbol{E} \subset \boldsymbol{R}^n$), ausreichende Glattheitseigenschaften der Zustandsgleichungen und der Kostenfunktionen sowie die Konvexität der Kostenfunktion in bezug auf die Entscheidung des Mitspielers (zur Sicherung der Eindeutigkeit seiner Antwort) vorausgesetzt. Unter der zusätzlichen Annahme, daß die punktweisen Minima der das Optimum charakterisierenden Hamilton-Funktionen im Inneren der Entscheidungsmengen liegen, wird ein die Open-loop-Lösung beschreibendes Gleichungssystem in [11] angegeben. Falls jedoch die Minima keine inneren Punkte darstellen und folglich auf dem Rand der Entscheidungsmengen liegen, beispielsweise bedingt durch Beschränkungen der Steuerungsfolgen, so treten die aus der Anwendung des Maximumprinzips in der Optimalsteuerung bekannten Probleme auf (z. B. keine Existenz analytischer Lösungen in geschlossener Form, singuläre Lösungen).

Generell ist festzustellen, daß für große Problemklassen (z. B. lineare Systeme mit nichtquadratischen Bewertungsfunktionen, verschiedene Klassen nichtlinearer Systeme) global gültige Existenzaussagen nur in dem auch für die Optimalsteuerung gültigen Rahmen erwartet werden können.

Im weiteren werden Spiele vom LQ-Typ mit den linearen Zustandsgleichungen

$$\boldsymbol{x}(k+1) = \boldsymbol{A}(k)\,\boldsymbol{x}(k) + \boldsymbol{B}_{\mathrm{F}}(k)\,\boldsymbol{u}_{\mathrm{F}}(k) + \boldsymbol{B}_{\mathrm{M}}(k)\,\boldsymbol{u}_{\mathrm{M}}(k) \quad (18)$$

und den quadratischen Kostenfunktionen

$$I_{\mathrm{F}}(\boldsymbol{u}_{\mathrm{F}}, \boldsymbol{u}_{\mathrm{M}}) = \sum_{k=0}^{N-1} [\boldsymbol{x}(k)^T \boldsymbol{Q}_{\mathrm{F}}(k)\,\boldsymbol{x}(k) + (\boldsymbol{u}_{\mathrm{F}}(k), \boldsymbol{u}_{\mathrm{M}}(k))^T \times \times \boldsymbol{R}_{\mathrm{F}}(k)\,(\boldsymbol{u}_{\mathrm{F}}(k), \boldsymbol{u}_{\mathrm{M}}(k))] , \quad (19)$$

$$I_{\mathrm{M}}(\boldsymbol{u}_{\mathrm{F}}, \boldsymbol{u}_{\mathrm{M}}) = \sum_{k=0}^{N-1} [\boldsymbol{x}(k)^T \boldsymbol{Q}_{\mathrm{M}}(k)\,\boldsymbol{x}(k) + (\boldsymbol{u}_{\mathrm{F}}(k), \boldsymbol{u}_{\mathrm{M}}(k))^T \times \times \boldsymbol{R}_{\mathrm{M}}(k)\,(\boldsymbol{u}_{\mathrm{F}}(k), \boldsymbol{u}_{\mathrm{M}}(k))] \quad (20)$$

betrachtet.

Unter zusätzlichen Parameterforderungen an die Matrizen $\boldsymbol{Q}_{\mathrm{F}}(k)$, $\boldsymbol{Q}_{\mathrm{M}}(k)$ und $\boldsymbol{R}_{\mathrm{F}}(k)$ bzw. $\boldsymbol{R}_{\mathrm{M}}(k)$ (Konvexitäts- und Invertierbarkeitsforderungen) existieren im Sinne von *Stackelberg* optimale Open-loop-Strategien mit rekursiv bestimmbaren Matrizen $\boldsymbol{K}.(k)$:

$$\boldsymbol{u}_{\mathrm{F}}^*(k) = -\boldsymbol{B}_{\mathrm{F}}^T(k) \cdot \boldsymbol{K}_{\mathrm{F}}(k)\,\boldsymbol{x}^*(k) , \quad (21\,\mathrm{a})$$

$$\boldsymbol{u}_{\mathrm{M}}^*(k) = -\boldsymbol{B}_{\mathrm{M}}^T(k) \cdot \boldsymbol{K}_{\mathrm{F}}(k)\,\boldsymbol{x}^*(k) . \quad (21\,\mathrm{b})$$

$\boldsymbol{x}^*(k)$ bezeichnet die optimale Open-loop-Trajektorie.

Eine vergleichbare Aussage erhält man für Feedback-Stackelberg-Strategien bei Vorliegen einer Informationsstruktur mit vollständiger Zustandsbeobachtung. In diesem Fall ergeben sich die Steuerungen als lineare Funktionen des aktuellen Systemzustandes

$$\boldsymbol{u}_{\mathrm{F}}^*(\boldsymbol{x}(k)) = -\boldsymbol{S}_{\mathrm{F}}(k)\,\boldsymbol{x}(k) , \quad (22\,\mathrm{a})$$

$$\boldsymbol{u}_{\mathrm{M}}^*(\boldsymbol{x}(k)) = -\boldsymbol{S}_{\mathrm{M}}(k)\,\boldsymbol{x}(k) , \quad (22\,\mathrm{b})$$

wobei die Matrizen $\boldsymbol{S}_{\mathrm{F}}(k)$ und $\boldsymbol{S}_{\mathrm{M}}(k)$ gleichfalls rekursiv bestimmbar sind.

Für die Existenz optimaler Closed-loop-Stackelberg-Strategien gibt es keine vergleichbaren allgemeinen Aussagen. Zur Demonstration der auftretenden Probleme wird folgendes Beispiel betrachtet [11]:

$$x(2) = x(1) - u_{\mathrm{M}} , \quad (23\,\mathrm{a})$$

$$x(3) = x(2) - u_{\mathrm{F}} \quad (23\,\mathrm{b})$$

und

$$I_{\mathrm{F}}(u_{\mathrm{F}}, u_{\mathrm{M}}) = x^2(3) + 2u_{\mathrm{F}}^2 + \beta u_{\mathrm{M}}^2 , \qquad \beta \geqq 0 , \quad (24\,\mathrm{a})$$

$$I_{\mathrm{M}}(u_{\mathrm{F}}, u_{\mathrm{M}}) = x^2(3) + u_{\mathrm{M}}^2 . \quad (24\,\mathrm{b})$$

Vorausgesetzt wird nun, daß der als zweiter handelnde Spielführer seine Strategie unter Nutzung der Kenntnis der Systemzustände $x(1)$ und $x(2)$ festlegt, während der Mitspieler nur über die Kenntnis des Zustandes $x(1)$ verfügt.

Für die Strategie des Spielführers gilt dann

$$u_{\mathrm{F}} = \gamma_{\mathrm{F}}(x(1), x(2)) = \gamma_{\mathrm{F}}(x(1), x(1) - u_{\mathrm{M}}) . \quad (25)$$

Unter Beschränkung auf Strategien γ_{F}, die eine eindeutige Reaktion des Mitspielers bedingen, antwortet dieser mit der vom Anfangszustand $x(1)$ und der vorgegebenen Strategie des Spielführers abhängigen Entscheidung

$$u_{\mathrm{M}} = \gamma_{\mathrm{M}}(x(1), \gamma_{\mathrm{F}}) = \arg \min_{u_{\mathrm{M}}} \times \times \{[x(1) - u_{\mathrm{M}} - \gamma_{\mathrm{F}}(x(1), x(1) - u_{\mathrm{M}})]^2 + u_{\mathrm{M}}^2\} . \quad (26)$$

Für den Spielführer lautet die zu lösende Minimierungsaufgabe dann

$$\gamma_{\mathrm{F}}^* = \arg \min_{\gamma_{\mathrm{F}}} \{[x(1) - \gamma_{\mathrm{M}}^*(x(1), \gamma_{\mathrm{F}}) - \gamma_{\mathrm{F}}]^2 + 2\gamma_{\mathrm{F}}^2 + \beta\gamma_{\mathrm{M}}^{*2}\} \quad (27)$$

mit $x_2 = \tilde{x}_2 = x_1 - \gamma_{\mathrm{M}}^*(x(1), \gamma_{\mathrm{F}})$.

Sie besteht in der Minimierung eines Funktionals über γ_{F}. Die dabei einzuhaltende Nebenbedingung ist eine zusätzliche Forderung an das von γ_{F} abhängige Minimum des Kostenfunktionals I_{M}, die γ_{F}^* erfüllen muß. Selbst bei zusätzlichen Differenzierbarkeitsforderungen an γ_{F}, um eine Anwendung der Variationsrechnung zu ermöglichen, ist nicht gesichert, daß die auf diese Weise eingeschränkte Klasse zulässiger Strategien die optimale Closed-loop-Stackelberg-Strategie enthält.

Diese Schwierigkeiten der direkten Bestimmung einer optimalen Closed-loop-Strategie zwingen dazu, einfacher zu bestimmende Näherungslösungen zu suchen. Grundsätzliche Wege dazu werden im folgenden Abschnitt gezeigt.

(wird fortgesetzt)

J. Uhlig

Verallgemeinerte Prädiktorregelung für Totzeitsysteme mit aperiodischem Einschwingverhalten – Anforderungen an die Prozeßmodellierung

0. Einleitung

Die Regelung von Systemen mit wesentlichen Totzeiten (Laufzeiten) bereitet nach wie vor Schwierigkeiten. In diesem Beitrag wird eine auf dem Prinzip der „Vorhersage durch ein inneres Modell" beruhende Regelung vorgestellt, die für stabile Prozesse mit aperiodischem Einschwingverhalten gute Ergebnisse zeigte, eine große Robustheit gegenüber Modellfehlern hat und keine einschneidenden Forderungen an die Struktur oder Linearität des Prozesses bzw. dessen Modell stellt. Ist die Regelstrecke linear, so erweist sich das Steuergesetz als eine Verallgemeinerung der sogenannten Prädiktorregelung [1] und [2]. Derartige Regelungen neigen bekanntlich zur Instabilität, sobald die Totzeit des inneren Modells nicht mit der des realen Prozesses übereinstimmt [3]. Durch Einführung einer veränderlichen, situationsabhängigen Unempfindlichkeit gelingt es, diese Schwierigkeit zu überwinden. Damit können die Forderungen an die Genauigkeit der Modellierung von Totzeitprozessen wesentlich herabgesetzt werden.
Entwickelt und erprobt wurde die vorgestellte Regelung am Modell eines großen Elektroenergieverbundsystems [5] und [6].

1. Grundgedanken des Regelungsprinzips

In diesem Abschnitt soll der entwickelte Regelalgorithmus zunächst anschaulich erläutert werden, bevor in den folgenden Teilen die formelmäßige Darstellung erfolgt.
Der betrachtete diskontinuierliche Regelkreis ist im Bild 1 dargestellt. Aus der Kenntnis eines (genäherten) Modells des ungestörten Prozesses wird zunächst die bei Beibehaltung der gegenwärtigen Steuerung u für die nächste Zeit zu erwartende Regelabweichung r vorausberechnet. Einen möglichen Verlauf zeigt Bild 2. Der gegenwärtige Takt sei k_0, und k_T kennzeichne die Totziet des Prozesses. δ sei eine vorgegebene Unempfindlichkeit. Die Steuerung u_k ($k > k_0$) sei so zu wählen, daß die Regelabweichung das durch $|r| \leqq \delta$ gegebene Toleranzband möglichst nicht verläßt.
Da der Prozeßausgang bis zum Takt $k_0 + k_T$ nicht mehr zu beeinflussen ist, werden nur die nachfolgenden Takte betrachtet. Bei Beibehaltung der gegenwärtigen Steuerung werde das Toleranzband im Takt $\varkappa_{k_0}$ verlassen. Um dies zu verhindern, muß die Steuerung spätestens im Takt $\varkappa_{k_0} - k_T$ verändert werden. Um bei $\varkappa_{k_0}$ bereits eine wirksame Korrektur von r zu erreichen, wird die „Vorgriffszeit" k_v eingeführt. Die Steuerung u wird im Takt $k_0 + 1$ verändert, wenn

$$\varkappa_{k_0} - k_T - k_v \leqq k_0 + 1$$

ist. Damit ist entschieden, ob im folgenden Takt eine Änderung von u erfolgt.
Zur Festlegung der Größe der Korrektur wird der Mittelwert ϱ_{k_0} der Regelabweichung über dem „Zeitintervall" von $k_0 + k_T + 1$ bis $k_0 + k_P$ herangezogen. Dabei ist $k_P \geqq k_T + 1$ frei wählbar und bestimmt, wieviel zukünftige Takte in die Betrachtung einbezogen werden (Prognosehorizont). Die Veränderung von u wird nun so gewählt, daß ihre statische Auswirkung gerade $-\varrho_{k_0}$ beträgt und somit die erwartete Abweichung des Prozeßausgangs vom Sollwert kompensiert.
Zur Vorausberechnung der Regelabweichung wird die gegenwärtig gemessene Abweichung einbezogen, so daß anliegende Störungen erfaßt werden. Die Vorausberechnung wird in jedem Takt für das gesamte Vorhersageintervall neu durchgeführt.

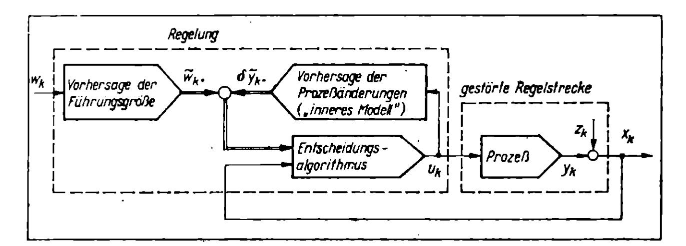


Bild 1. Struktur des Regelkreises

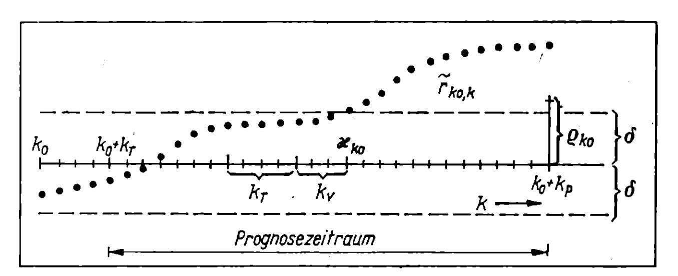


Bild 2. Prognose der Regelabweichung $\tilde{r}$

Das zur Vorhersage verwendete Modell (inneres Modell) wird das Verhalten des realen Prozesses i. allg. nur fehlerhaft wiedergeben. Kritisch sind vor allem fehlerhafte Totzeiten, die zur Instabilität des geschlossenen Kreises führen können. Diese Schwierigkeit wird im vorgestellten Algorithmus dadurch überwunden, daß die Unempfindlichkeit δ in Abhängigkeit von der vorausberechneten Größe r verändert wird. Wenn aufgrund zurückliegender Eingriffe eine starke Veränderung des Prozeßausgangs in der zeitlichen Umgebung von k_0 erwartet wird, so werden Fehler in der Vorausberechnung durch eine kurzzeitige Vergrößerung von δ unterdrückt (s. Abschn. 6.). Das hier skizzierte Vorgehen hat sich bei komplizierten und nichtlinearen Prozessen als sehr robust und leistungsfähig erwiesen. Die folgenden Abschnitte enthalten eine detaillierte Darstellung des Regelalgorithmus.

2. Prozeßmodell

Der zu regelnde Prozeß werde durch das diskrete, nicht notwendig lineare Modell

$$\eta_k = \varphi(\eta_{k-1}, u_{k-k_T})\,, \tag{1a}$$

$$y_k = \psi(\eta_k) \tag{1b}$$

mit dem Taktindex k, der „Totzeit" k_T und dem Vektor η der inneren Zustände beschrieben. Dabei sei φ die (vektorielle) Übergangs- und ψ die (skalare) Ausgabefunktion. Zusammen mit der additiv angenommenen Störung ergibt sich die Regelabweichung (s. Bild 1) zu

$$r_k = w_k - x_k = w_k - y_k - z_k\,. \tag{2}$$

Das statische Verhalten des Prozesses bei konstantem Eingang u_0 werde durch

$$y_\infty = \Phi(u_0) \tag{3}$$

beschrieben.
Das für die Regelung zur Verfügung stehende „innere Modell" wird gegenüber (1) und (3) Abweichungen aufweisen. Es werde durch $\tilde{\varphi}$, $\tilde{\psi}$ bzw. $\tilde{\Phi}$ mit der Totzeit $\tilde{k}_T$ beschrieben (vgl. (7)). Für die Unterschiede der Totzeiten sei zumindest eine obere Schranke bekannt

$$|k_T - \tilde{k}_T| \leqq \Delta k_T\,. \tag{4}$$

Die Stabilität des realen Prozesses (1) und des diesen approximierenden inneren Modelles wird vorausgesetzt.

Dr. rer. nat. *Joachim Uhlig* (54) studierte von 1951 bis 1956 Mathematik. Anschließend von 1956 bis 1969 Assistent und Oberassistent am Institut für Angewandte Mathematik der TU Dresden. 1958 Promotion auf dem Gebiet der Numerischen Mathematik. Von 1969 bis 1981 wissenschaftlicher Abteilungsleiter im Bereich Technische Kybernetik des Zentralinstituts für Kybernetik und Informationsprozesse der AdW der DDR, seit 1982 dort wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Regelungssysteme. Seit 1959 nebenamtliche Lehrtätigkeit an der TU Dresden.

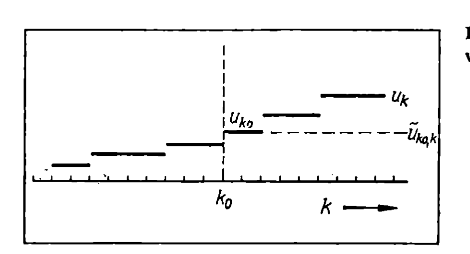


Bild 3. Zur Konstruktion von $\tilde{u}_{k_0,k}$ (vgl. (6))

3. Vorhersage der Regelabweichung

Im folgenden bezeichne k_0 stets den gegenwärtigen Takt. Ist

$$\{u_k\};\ k = 0, \dots, k_0 \tag{5}$$

die bisher abgegebene Steuerfolge, so können damit (entsprechende Kenntnis der Anfangszustände vorausgesetzt) die Modellausgänge y_k für $k \leqq k_0 + k_T$ bestimmt werden. Für eine darüber hinaus gehende Vorhersage sind Annahmen über zukünftige Steuerungen u_k mit $k > k_0$ erforderlich. Dazu dient die folgende Konstruktion (Bild 3)

$$\tilde{u}_{k_0k} := \begin{cases} u_k & k \leqq k_0 , \\ u_{k_0} & k > k_0 . \end{cases} \tag{6}$$

Wird diese Steuerfolge auf das innere Modell gegeben, so ergibt sich mit

$$\tilde{\eta}_{k_0,k} := \tilde{\Phi}(\tilde{\eta}_{k_0,k-1}, \tilde{u}_{k_0,k-k_T}) \tag{7a}$$

die Ausgangsfolge zu

$$\tilde{y}_{k_0,k} := \tilde{\psi}(\tilde{\eta}_{k_0,k}) . \tag{7b}$$

Inhaltlich bedeuten $\tilde{y}_{k_0,k}$ bzw. $\tilde{\eta}_{k_0,k}$ die im Takt k_0 abgegebenen Prognosen für die Größen y_k bzw. η_k für einen Takt k, falls die Steuerung entsprechend (6) auf dem zuletzt realisierten Wert u_{k_0} verharrt.

Für die Regelabweichung gilt

$$\begin{aligned} r_k &= w_k - y_k - z_k , \\ &= w_k - x_{k_0} - (y_k - y_{k_0}) - (z_k - z_{k_0}) . \end{aligned}$$

Für die unbekannten, zukünftigen Größen w_k und y_k werden nun Vorhersagegrößen $\tilde{w}_{k_0,k}$ und $\tilde{y}_{k_0,k}$ eingesetzt. Ebenso wird die der Messung nicht zugängige Größe y_{k_0} durch $\tilde{y}_{k_0,k_0}$ nach (7) ersetzt. Damit ergibt sich

$$\tilde{r}_{k_0,k_0} := \tilde{w}_{k_0,k} - x_{k_0} - (\tilde{y}_{k_0,k} - \tilde{y}_{k_0,k_0}) - (z_k - z_{k_0}) .$$

Für die Störung z wird eine detaillierte Vorhersage oft nicht möglich sein. Dann wird zweckmäßig angenommen, daß diese unverändert bestehen bleibt, d. h.

$$z_k = z_{k_0} . \tag{8}$$

Demgegenüber dürfte sich für die Führungsgröße in den meisten Fällen eine Vorhersage $\tilde{w}_{k_0,k} \approx w_k$ finden lassen. Andernfalls ist wie mit der Störung zu verfahren.

Mit der vorhergesagten Änderung des Prozeßausganges

$$\delta\tilde{y}_{k_0,k} := \tilde{y}_{k_0,k} - \tilde{y}_{k_0,k_0} \tag{9}$$

ergibt sich dann

$$\tilde{r}_{k_0,k} = \tilde{w}_{k_0,k} - x_{k_0} - \delta\tilde{y}_{k_0,k} . \tag{10}$$

Die damit erhaltene voraussichtliche Regelabweichung des Taktes k setzt sich also aus einer Schätzung der zukünftigen Führungsgröße w_k, dem gegenwärtigen gestörten Prozeßausgang x_{k_0} und einer aufgrund zurückliegender Steuerungen noch zu erwartenden Änderung $\delta\tilde{y}_{k_0,k}$ zusammen.

Durch den Prognosehorizont $k_P \geqq k_T + 1$ wird festgelegt, für wie viele zukünftige Takte die Regelabweichung bei der Ermittlung der Steuerung berücksichtigt werden soll.

Mit

$$k_0 + \tilde{k}_T + 1 \leqq k \leqq k_0 + k_P \tag{11}$$

ist dann der Prognosezeitraum festgelegt. In den vorausgehenden Takten ist der Prozeßausgang durch (5) bereits festgelegt.

Der Mittelwert der erwarteten Regelabweichung ergibt sich zu

$$\varrho_{k_0} := \frac{1}{k_P - \tilde{k}_T} \sum_{j=\tilde{k}_T+1}^{k_P} \tilde{r}_{k_0,k_0+j} . \tag{12}$$

4. Algorithmus der Regelung

Mit

$$\varkappa_{k_0} := \min \{k: \tilde{r}_{k_0,k} \cdot \operatorname{sign}(\varrho_{k_0}) \geqq \delta,\ k_0 + \tilde{k}_T < k \leqq k_0 + k_P\} \tag{13}$$

wird derjenige Takt des Prognosezeitraumes (11) ermittelt, in dem die erwartete Regelabweichung (10) erstmals die durch δ gegebene Unempfindlichkeitszone (siehe Abschn. 6., (23)) in der durch das Vorzeichen von (12) festgelegten Richtung verläßt (s. Bild 2). Tritt dies im gesamten Prognosezeitraum nicht ein, wird

$$\varkappa_{k_0} = k_0 + k_P + 1$$

gesetzt.

Die Amplitude der Steuerungskorrektur wird so gewählt, daß ihre statische Auswirkung gerade den Mittelwert der Regelabweichung kompensiert. Damit ergibt sich die Steuerung im Takt $k_0 + 1$ zu

$$u_{k_0+1} := \begin{cases} u_{k_0} & (\text{falls } k_0 < \varkappa_{k_0} - \tilde{k}_T - k_v - 1) , \\ \tilde{\Phi}^{-1}[\tilde{\Phi}(u_{k_0}) + \varrho_{k_0}] & (\text{sonst}) . \end{cases} \tag{14}$$

Dabei beschreibt $\tilde{\Phi}$ analog zu (3) die Statik des inneren Modells (7). Wird diese als linear angenommen ($y_\infty = Ku$), so geht (14) über in

$$u_{k_0+1} := \begin{cases} u_{k_0} & (\text{falls } k_0 < \varkappa_{k_0} - k_T - k_v - 1) , \\ u_{k_0} + \frac{1}{K}\varrho_{k_0} & (\text{sonst}) . \end{cases} \tag{15}$$

Die bereits im Abschn. 2. eingeführte Vorgriffszeit k_v ist unter Beachtung von

$$k_v \geqq \Delta k_T \tag{16}$$

zu wählen.

5. Spezialfall — Prädiktorregler

Um zu einem Vergleich mit bekannten Reglerstrukturen zu gelangen, wird in diesem Abschnitt eine lineare Regelstrecke vorausgesetzt. Statt (1) wird dann günstiger die Beschreibung durch die diskrete Laplace-Variable

$$\mathfrak{z} = e^{-p\Delta t} \qquad (\Delta t \text{ Taktzeit}) \tag{17}$$

verwendet:

$$y(\mathfrak{z}) = G(\mathfrak{z})\, \mathfrak{z}^{-k_T} U(\mathfrak{z}) . \tag{18}$$

Das innere Modell stimme damit exakt überein.

Wird in (11)

$$k_P = k_T + 1 \tag{19}$$

gesetzt, so besteht der Prognosezeitraum nur aus dem einen Takt

$$k_1 := k_0 + k_T + 1 .$$

Werden weiterhin

$$k_v = \delta = 0 \tag{20}$$

gesetzt, so kann das nach (15) geregelte System durch das im Bild 4a gegebene Blockschaltbild dargestellt werden. Dabei ist $K = G(1)$ die statische Verstärkung der Strecke. Die Übertragungsfunktion des durch getrichelte Linien zusammengefaßten Blockes ist

$$G_1(\mathfrak{z}) = \frac{1}{K(\mathfrak{z} - 1) + G(\mathfrak{z})} .$$

Für hinreichend kleine Taktzeit Δt ist $\mathfrak{z} \approx 1$ (vgl. (17)) und

$$G_1(\mathfrak{z}) \approx \frac{1}{G(\mathfrak{z})} .$$

Damit geht Bild 4a in Bild 4b über. Diese Struktur ist als Prädiktorregelung bekannt [1] bis [3], die sich damit als ein (durch Beschränkung auf die lineare Strecke (18), Kenntnis des exakten Modells sowie durch die spezielle Parameterwahl (19) und (20) entstehender) Spezialfall des oben abgeleiteten Algorithmus erweist.

6. Stabilitätssicherung

Bekanntlich neigen Prädiktorregler zur Instabilität, falls das verwendete innere Modell das tatsächliche Verhalten des zu regelnden Prozesses nicht genau wiedergibt. Besonders kritisch sind dabei Totzeitfehler [3]. Diese Instabilität kann durch eine geeignete, situationsabhängige Handhabung der Unempfindlichkeit δ überwunden werden. Dazu wird zunächst ein Maß E_{k_0} für die in der zeitlichen Umgebung von k_0 zu erwartenden Änderungen der Regelabweichung gebildet. Es sei

$$e_{k_0,k} := \tilde{r}_{k_0,k} - \tilde{r}_{k_0,k-1} \quad (k > k_0)\,. \tag{21a}$$

Rückwirkend wird definiert

$$e_{k_0,k_0} := e_{k_0-1,k_0} \tag{21b}$$

$$e_{k_0,k} := e_{k,k} \quad (k < k_0) \tag{21c}$$

und damit

$$E_{k_0} := \sum_{j=-\Delta k_T}^{\Delta k_T} |e_{k_0,k_0+j}|\,. \tag{22}$$

Die Unempfindlichkeit δ wird dann durch

$$\delta_{k_0} := \varepsilon + E_{k_0} \tag{23}$$

den zu erwartenden Prozeßänderungen angepaßt. ε ist dabei eine unveränderliche Grundunempfindlichkeit. Entsprechend ist in (13) der Wert δ durch δ_{k_0} zu ersetzen. Damit wird erreicht, daß die Regelung nur dann eingreift, wenn die voraussichtlichen Regelabweichungen den zu erwartenden Vorhersagefehler übersteigen. Dieser Sachverhalt soll durch das folgende einfache Beispiel verdeutlicht werden. Betrachtet wird eine reine Totzeitstrecke $y_k = u_{k-2}$ $(k_T = 2)$. Das innere Modell sei $\tilde{y}_k = u_{k-3}$ $(\tilde{k}_T = 3)$. Weiterhin sei $w_k = 0$ $(\forall k)$, $z_k = 1$ $(k \geqq 0)$ sowie $u_k = 0$ $(k < 0)$. Entsprechend (19) und (20) wird $k_P = \tilde{k}_T + 1 = 4$, $k_V = \varepsilon = 0$ gesetzt.
Bild 5a zeigt den Verlauf der Ausgangsgröße x_k im Fall der bekannten Prädiktorregelung nach [1] bis [3] bzw. Bild 4c. Bild 5b zeigt die gleiche Größe mit der hier vorgestellten Regelung $(\Delta k_T = 1)$. Im Bild 5a ist die auftretende Instabilität deutlich zu erkennen, wogegen im Bild 5b die Störung nach Ablauf der Totzeit vollständig ausgeregelt wird.
Es muß jedoch darauf hingewiesen werden, daß ein exakter Stabilitätsnachweis für den vorgeschlagenen Regelungsalgorithmus nicht vorliegt. Ohne nähere Voraussetzungen an den sehr allgemeinen Prozeß (1) und das diesen näherungsweise beschreibende Modell (7) dürfte ein solcher Stabilitätsnachweis auch nicht zu erbringen sein. In [4] wurde das hier vorgestellte Prinzip heuristisch begründet und zur Steuerung des in [5] und [6] beschriebenen, sehr komplizierten, nichtlinearen zeitvariablen Modells eines Elektroenergieverbundsystems angewendet, das zeit- und zustandsabhängige Totzeiten enthält. Außerdem wurden in [7] umfangreiche Simulationsuntersuchungen durchgeführt. In allen Fällen ergaben sich stets befriedigende Ergebnisse.

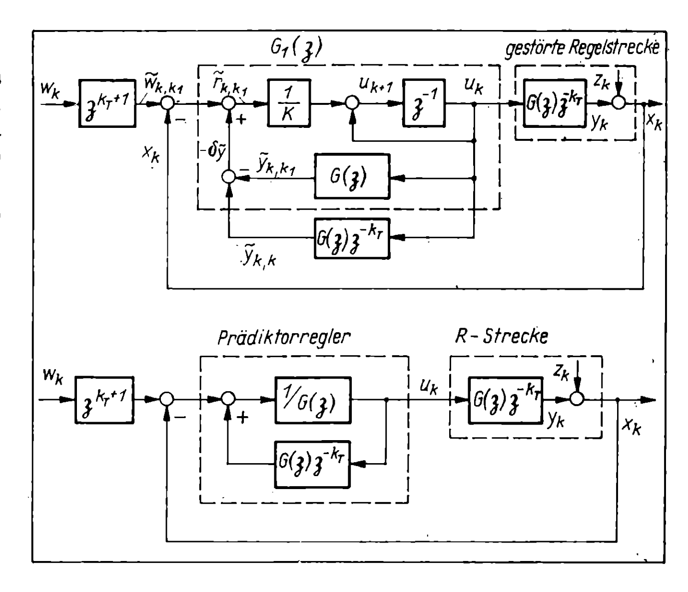


Bild 4. Linearer Spezialfall — Prädiktorregler

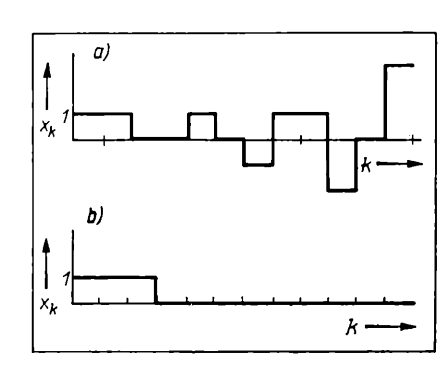


Bild 5. Regelgröße bei Totzeitstrecke und fehlerhaftem Modell
a) Prädiktorregelung nach [1] und [2]; b) verallgemeinerte Prädiktorregelung

Zusammenfassung

Der vorgestellte Regelalgorithmus erfordert ein genähertes Modell (7) der Regelstrecke, eine Abschätzung (4) der Totzeitfehler und die Festlegung der Parameter ε, k_P, k_V.
Von dem ungestörten Prozeß werden Stabilität und überwiegend aperiodisches Übergangsverhalten gefordert. Störungen sollen aperiodisch sein oder zumindest soll ihre Periodendauer über k_P liegen. An die Modellierung werden keine Forderungen hinsichtlich struktureller Übereinstimmung von Prozeß (1) und Modell (7) gestellt. Die Unterschiede in den Totzeiten sollten möglichst nur wenige Takte betragen. Die Statik von Modell und Prozeß sollte möglichst gut übereinstimmen.
Wichtig ist die richtige Wahl der Schranke (4). Überschreitet der tatsächliche Fehler diese Schranke, so ist die Stabilität des Regelkreises gefährdet. Wird Δk_T zu groß gewählt, kann sich in ungünstigen Fällen die Bekämpfung eingetretener Störungen verzögern. Die Arbeitsfähigkeit der Regelung bleibt jedoch in weiten Grenzen erhalten.
Fehler in den Dynamikanteilen des Modells werden durch die Mittelwertbildung (12) weitgehend ausgeglichen. Verbleibende Mittelwertfehler können durch entsprechende Wahl der Grundunempfindlichkeit ε in (23) unterdrückt werden.
Durch die Gleichungen

— (6), (7), (9), (10) (Vorhersage durch inneres Modell)
— (21), (22), (23) (Festlegung der Unempfindlichkeit)
— (12), (13), (14) bzw. (15) (Ermittlung der Steuerung)

ist eine Regelung festgelegt, die nur sehr geringe Anforderungen an Struktur und Genauigkeit der Prozeßmodellierung stellt. Sie gewährleistet eine zuverlässige und robuste regelungstechnische Beherrschung von Totzeitprozessen mit überwiegend aperiodischem Übergangsverhalten und aperiodischen Störungen. Allerdings erfordert die Regelung im Vergleich zu üblichen Prädiktorregelungen einen vergleichsweise hohen On-line-Rechenaufwand. Sie dürfte somit besonders zur Steuerung größerer Prozeßabschnitte geeignet sein, da auf dieser Ebene einerseits eine genaue Modellierung kaum noch möglich ist, andererseits entsprechende Rechentechnik (Wartenrechner) zur Verfügung steht.

Literatur

[1] *Smith, O. J. M.:* A controller to overcome Dead Time. ISA-Journal 6.2 (1959) pp. 28–33.
[2] *Frank, P. M.:* Vollständige Vorhersage im stetigen Regelkreis mit Totzeit. Regelungstechnik 16 (1968), S. 111–116 und 214–218.
[3] *Isermann, R.:* Digitale Regelsysteme. Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag 1977.
[4] *Haufe, B.; Küßner, K.; Uhlig, J.:* Konzeption der automatischen Sekundärregelung. Forschungsbericht ZKI der AdW der DDR 1985.
[5] *Küßner, K.; Uhlig, J.:* Modellierung von Elektroenergiesystemen zur on-line Steuerung energetischer Vorgänge. 5. Arbeitstagung „Algorithmisierte Prozeßanalyse". Dresden 1984, S. 45–50.
[6] *Uhlig, J.:* Aspekte der Modellierung und Steuerung großer Elektroenergiesysteme aus der Sicht der oberen Steuerungsebene. 30. IWK Ilmenau 1985, S. 339–342.
[7] *Gamaleja, T.:* Experimentelle Untersuchungen zum dynamischen Verhalten einer verallgemeinerten Prädiktorregelung. Interner Forschungsbericht des ZKI der AdW der DDR 1985.

msr 8689

S. F. Bocklisch

Beratungssysteme mit unscharfen Klassifikatoren und Klassifikatornetzen

0. Einleitung

Komplizierte und komplexe Problemstellungen sind in vielen Bereichen anzutreffen. Sie sind oft einer theoretischen Prozeßanalyse nicht zugänglich. Es liegt aber durchaus Wissen von Experten, aus aktiven Experimenten, Beobachtungen oder Simulationsuntersuchungen, über sie vor, und es ist notwendig, auch unter den Bedingungen von Unsicherheiten Entscheidungen zu treffen und eine Prozeßführung zu sichern.
Im folgenden wird ein Rahmensystem vorgestellt, das zusammen mit einer Entwurfsstrategie zur Erstellung einsatzfähiger Beratungssysteme für spezielle derartige Probleme dienen kann. Seine theoretischen Grundlagen werden durch die Klassifikation und die Theorie unscharfer Mengen gebildet. Als Besonderheit lassen sich Unsicherheiten bei den Basisinformationen (objektive Messungen oder subjektive Einschätzungen durch einen Experten) und bei den Klassifikationsmodellen erfassen und bearbeiten. Dadurch wird eine prozeßrelevante Modellbildung erreicht. Als Klassifikationsergebnis werden Zugehörigkeitswerte zu allen erklärten Klassen berechnet, die eine semantische Bedeutung (z. B. Güte-, Fehler- oder Steuerklassen) haben. Damit werden nicht nur eine Identifikation der aktuellen Situation und ein Prozeßeingriff (Steuerung) entworfen, sondern auch das Risiko dieser Ergebnisse angegeben.

1. Beratungssysteme

Beispiele für die eingangs genannten Systeme findet man in der Medizin, Ökonomie, Umweltdynamik, Biotechnologie und zunehmend auch bei großen technischen Systemen, beispielsweise bei der flexiblen automatisierten Fertigung oder der Steuerung in der Energie- und Verfahrenstechnik. Viele Steuerentscheidungen sind von einem Menschen (Entscheidungsträger) zu verantworten, und es handelt sich um Entscheidungen mit Risiko. Da die Anforderungen in solchen Situationen sehr hoch sind, ist die Nutzung wenigstens des gesicherten Wissens eine Forderung. Zum Einsatz kommen hier mehr und mehr computergestützte Beratungssysteme [1]. Sie dienen der Sammlung, Speicherung, Aktualisierung und Nutzung verschiedener Formen von Wissen. Es gehören dazu wissenschaftlich bzw. empirisch gesicherte Zusammenhänge, die sich in Form von Formeln, Gleichungen, Funktionen oder Diagrammen niederlegen lassen. Andererseits handelt es sich um Wissen, das Fakten, Regeln und Zusammenhänge anerkannter Experten bzw. Expertengruppen beinhaltet. Diese computergestützten Systeme dienen der rationellen Nutzung der verschiedenen prozedural und deklarativ beschriebenen Wissensformen und der leichten Verbreitung der Erkenntnisse durch Kopien von Datenträgern sowie der effektiven Wissensnutzung. Einsatzgebiete liegen bei Entscheidungsprozessen, die bisher vorrangig dem Menschen (z. B. Ingenieur, Arzt, Dispatcher, Leiter) oblagen. Beratungssysteme assistieren Personen, die selbst nicht über das gesamte in das System eingebrachte Wissen verfügen können. Für sie sind leistungsfähige Rechner eine Voraussetzung, obwohl deren konkrete Leistungsparameter natürlich von der Aufgabe und den Anforderungen abhängen. Oft wird das gesamte über den Problemkreis verfügbare Wissen in einer Wissensbank auf einem recht leistungsfähigen Rechner gespeichert, verwaltet und verarbeitet. Die leichte Nutzung der geeignet strukturierten Wissensbasis kann dann auf Rechnern mit geringeren Leistungsparametern erfolgen. Wesentliche Entscheidungen liegen trotz der Beratung durch das System weiterhin beim Menschen. Gründe dafür sind, außer der Tatsache, daß er noch über Zusatzinformationen verfügt und weitere Zusammenhänge kennt, moralischer, ethischer und auch

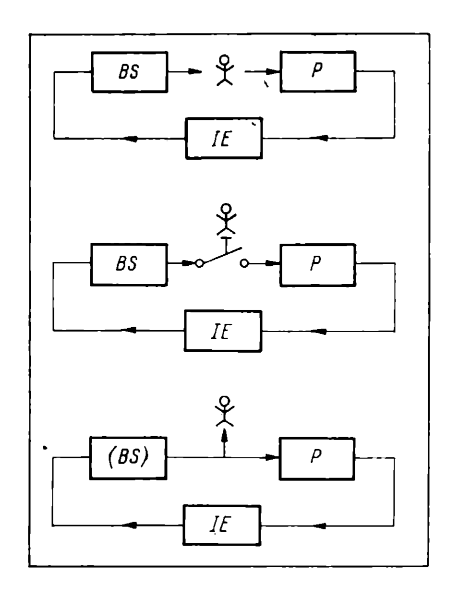
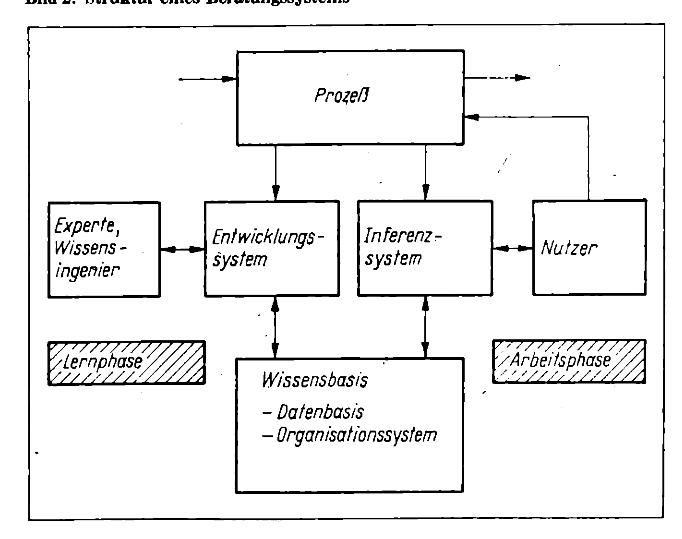


Bild 1. Stellung des Menschen zum Prozeß (P), zum Beratungssystem (BS) und zur Informationserfassung (IE)

juristischer Natur. Dennoch durchlaufen einige Beratungssysteme verschiedene Entwicklungsetappen. Es existiert das Stadium, in dem der Mensch noch voll in den Regelkreis integriert ist, der aus Problem bzw. Prozeß (P), Informationserfassung (IE) und Beratungssystem (BS) gebildet wird (Bild 1a). Es gibt dann Formen der Herauslösung des Menschen, bei der er eine angebotene Entscheidung prüft und quittiert (Bild 1b), bis zu vollautomatischen Systemen, bei denen nur noch eine Information des Menschen (evtl. zu festgelegten Zeitpunkten) über die realisierte Aktivität erfolgt (Bild 1c). Im letzten Fall muß man dann statt von einem Beratungssystem von einem Automaten sprechen.
Das hier beschriebene System hat die prinzipielle Struktur wie alle Beratungssysteme (Bild 2). Gegenstand der Betrachtung ist ein *Prozeß*. Die Abgrenzung dieses zu modellierenden Problemkreises sollte so exakt wie möglich sein, obwohl Unsicherheiten durch Störungen und unvollständiges Wissen, d. h. des Modells, nicht auszuschalten sind. Zu den wesentlichen Komponenten gehört das *Entwicklungssystem* zur Wissensaufnahme, -speicherung, -verarbeitung und -aktualisierung. Mit ihm stehen der *Experte* für das Problem und zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch Spezialisten für den Entwurf solcher Systeme (*Wissensingenieure*) in Verbindung. Das Zentrum bildet die *Wissensbasis*, über die auch der Zusammenhang zwischen der Lern- bzw. Entwurfs- und der Arbeits- bzw. Nutzungsphase hergestellt ist. Sie besteht aus einer Datenbasis (Datenbank), die eine möglichst große In-

Bild 2. Struktur eines Beratungssystems



Dr. sc. techn. *Steffen F. Bocklisch* (41) studierte von 1964 bis 1969 Technische Kybernetik an der TH Karl-Marx-Stadt und war dort anschließend bis 1972 Forschungsstudent. 1972 Promotion A. Von 1972 bis 1983 wissenschaftlicher Assistent und Oberassistent im WB Technische Kybernetik der Sektion Automatisierungstechnik der TH Karl-Marx-Stadt. 1981 Promotion B. Seit 1983 wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Mechanik Karl-Marx-Stadt der AdW der DDR, jetzt Arbeitsgruppenleiter. Vorsitzender der GDR Working Group for Fuzzy Sets and Systems.

formationsmenge evtl. in vorverarbeiteter und damit gezielt komprimierter Weise umfassen soll, und einem Organisationssystem, mit dem die Wissensstrukturierung realisiert wird. Der *Nutzer*, der ein konkretes aktuelles Problem zu lösen hat, greift mittels des *Inferenzsystems* auf die Wissensbasis zu. Leistungsfähige und flexible Dialog-, Erklärungs- und Manipulationsmöglichkeiten sind auf beiden Seiten erforderlich.

2. Unscharfe Klassifikation

2.1. *Klassenbildung und Klassenbeschreibung*

Grundlage jeder vektoriellen Klassifikation — und auf diese wird sich hier beschränkt — ist eine Objektmenge, wobei jedes Objekt X durch einen n-dimensionalen Merkmalsvektor charakterisiert wird und problemspezifisch interpretierbar ist (z. B. als technisches, biomedizinisches, ökonomisches oder ökologisches System, bestimmt durch n Einzelinformationen).

$$X : \boldsymbol{m} = (m_1, m_2, \dots, m_n)^T \qquad (1)$$

An Skalen und folglich auch an Variablen, die zu Merkmalen führen, werden die *nichtmetrischen* nominalen und ordinalen Skalen und die *metrischen* Intervall- und Verhältnisskalen unterschieden. Zu den metrischen gehören direkt gemessene oder vorverarbeitete Signale und Bestimmungsgrößen des Prozesses. Die Klassifikation ist bereits auf der allgemeinen Stufe der Nominalskale erklärt. Durch den Menschen werden Informationen oft mittels ordinaler Skalen gegeben. Derartige Variable (linguistische Variable) haben Werte wie „klein", „mittel" oder „groß". Die Besonderheit der unscharfen Klassifikation besteht darin, daß alle Arten von Skalen (auch in ihrer Kombination) verarbeitet werden können.

Unter einer Klassifikation versteht man die Einteilung von Objekten in Klassen mit ebenfalls inhaltlicher Bedeutung. Sie ist eine fundamentale Ordnungsoperation. Es ist möglich, jedes Objekt nur einer Klasse zuzuordnen (Disjunktheit) oder eine Zugehörigkeit zu mehreren Klassen zu erklären (Nichtdisjunktheit). Mit der Theorie unscharfer Mengen (fuzzy sets [2]) kann diese Klassenzugehörigkeit graduiert durch eine Maßzahl aus dem Intervall [0, 1] ausgedrückt werden. Während Objekte *elementare* Informationen tragen, liefern Klassen mit ihrer Gesamtheit an Objekten *globale* Informationen. Entsprechend der Schärfe der Betrachtung (Modellierung), d. h. ihrer Grobheit oder Feinheit, lassen sich Objekte in Teile zerlegen, also als Klassen interpretieren, oder auch Klassen als Objekte auffassen. In dieser Modellhierarchie lassen sich über die Ebenen Klassen, Super-, Hyperklassen usw. bilden. Die Analogie zum Systembegriff ist offenkundig.

Bei der Erstellung eines Klassifikationsmodells (Klassenkonfiguration, Klassifikator) kann mit einem Experten oder Lehrer gearbeitet werden. Es werden dann *semantische* Klassen angelernt. Es kann aber auch auf einen solchen verzichtet werden. Die Ähnlichkeitsmaße sind dann formaler Natur, und es entstehen vorerst *natürliche* Klassen. In einem Dialog müssen auch sie inhaltlich durch den Fachmann interpretiert werden. Eine Möglichkeit dieser Strukturbildung ist die Clusterung. Sie ist im Gegensatz zu den Expertenfestlegungen statistischer Natur, da sie Aussagen über den inneren Zusammenhang von Datenmengen liefert. Somit kann man sie als eine Modellbildungsmethode der experimentellen Prozeßanalyse verstehen.

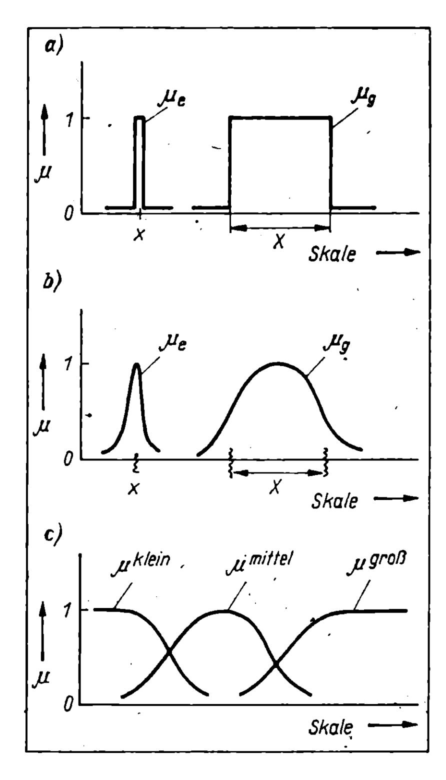
Für die Klassenbeschreibung sind verschiedene (scharfe) Verfahren bekannt. Zu ihnen gehören die klassengeordnete Aufzählung der Objekte, die Beschreibung durch lineare, stückweise lineare oder nichtlineare Trenngebilde (speziell auch Schwellwerte) oder klassenumschreibende Gebilde, wie Hyperquader oder Hyperkugeln in hochdimensionalen Merkmalsräumen. Für das vorgestellte Verfahren wird ein modifiziertes Potentialfunktionskonzept benutzt, auf das im Abschn. 3. näher eingegangen wird.

2.2. *Unschärfe bei elementaren und globalen Informationen*

Bei den Basisinformationen und folglich auch bei den Klassen liegt zum Teil eine erhebliche Unschärfe vor. Sie beruht auf Meßgerätefehlern, Störeinflüssen beim Messen, nichtreproduzierbaren Anfangs- und Randbedingungen oder auch subjektiven Bewertungen durch Experten bei Verwendung der nichtmetrischen linguistischen Variablen. Auch bei den funktionalen

Bild 3. Beschreibungen von Einzelinformationen und Klassen durch Zugehörigkeitswerte μ

a) in scharfer Weise; b) in unscharfer Weise; c) linguistische Variable in unscharfer Weise



und relationalen Zusammenhängen liegt Unkenntnis über die exakten Systemcharakteristika vor. Bei der scharfen Betrachtung wird eine Einzelinformation x oder auch eine Klasse X (Bild 3a) durch eine elementare oder globale Zugehörigkeitsfunktion beschrieben, die nur die beiden Wahrheitswerte 0 oder 1 erlaubt. Bei der unscharfen Beschreibung sind im Gegensatz dazu für die Zugehörigkeit alle Abstufungen zwischen 0 und 1 zugelassen (Bild 3b). Speziell linguistische Variable können somit durch Funktionen beschrieben werden, die an den Expertengebrauch dieses Ausdrucks angepaßt werden müssen (Bild 3c). Die inhaltliche Aussage besteht darin, daß der Umgebung des wirklich beobachteten Wertes eine Auftrittschance gegeben wird. Für die Klassen heißt das, daß zentrale Objekte i. allg. eine hohe Zugehörigkeit haben. Demgegenüber haben Randobjekte eine niedrigere und Objekte außerhalb der Klasse, jedoch in deren unmittelbarer Nähe, ebenfalls eine gewisse Klassenzugehörigkeit. Die Festlegung der Zugehörigkeitsfunktion kann subjektiv (durch den Experten) oder auch objektiv über die Beobachtung von Meß- oder Reproduzierbarkeitsfehlern erfolgen.

Im Unterschied zur Wahrscheinlichkeitstheorie hat die unscharfe Klassifikation folgende Besonderheiten:

- Die Zugehörigkeitsfunktion ist nicht flächennormiert.
- Die Zugehörigkeit ist eine Bewertung, die nicht auf statistisch häufigem Auftreten beruhen muß, sondern eine Wahrheitsbewertung aus der Sicht eines anderen Kriteriums zur Grundlage haben kann.
- Es wird nur das positive Wissen bewertet, d. h. nicht auf die komplementäre (negierte) Aussage geschlossen. Damit können Klassen verändert, gestrichen oder hinzugefügt werden, ohne das „alte" Wissen antasten zu müssen. Dies ist für selbstlernende Verfahren von großer Bedeutung.
- Die Aggregationsmöglichkeiten unscharf beschriebener Informationen sind prinzipiell sehr frei.

Mit der unscharfen Klassifikation steht für Beratungssysteme ein flexibles und leistungsfähiges Instrument als theoretische Basis zur Verfügung. Die Wissensbasis wird nach einem mengentheoretischen (also nicht funktionellen) Konzept erstellt. Die semantisch interpretierbaren Situationen werden in einem hochdimensionalen Merkmalsraum formal als Klassen beschrieben, die sich gegenseitig nicht beeinflussen. Sie haben beispielsweise die Bedeutung von Güteklassen, Klassen einheitlicher Lösungsstrategien oder Prozeßeingriffe. Bild 4 zeigt schematisch drei Klassenzugehörigkeitsfunktionen über einem zweidimensionalen Merkmalsraum.

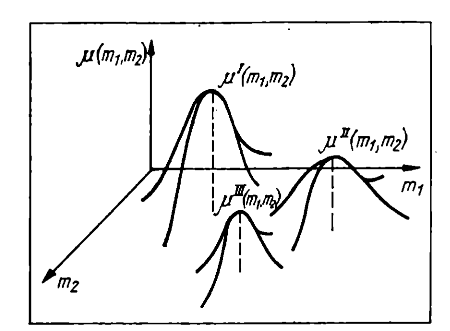


Bild 4. Schematische Darstellung von Zugehörigkeitsfunktionen für drei Klassen über einen zweidimensionalen Merkmalsraum

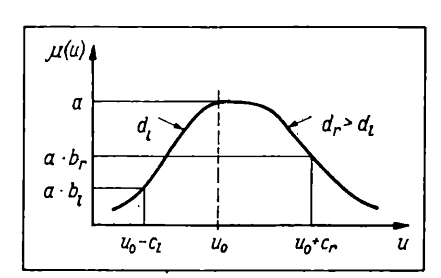


Bild 5. Eindimensionale Zugehörigkeitsfunktion mit ihren Parametern

3. Einheitliches Konzept einer Zugehörigkeitsfunktion

Ein konkretes Konzept soll einen akzeptablen Kompromiß zwischen den beiden widersprüchlichen Forderungen nach Adaptivität an die Ausgangsdaten und Ökonomie (z. B. Speicheraufwand) darstellen. Bei dem entwickelten parametrischen Konzept [3] handelt es sich um ein modifiziertes Potentialfunktionskonzept. Es ist in der Lage, sowohl elementare als auch globale Informationen zu beschreiben. Der Typ für die Zugehörigkeitsfunktion ist für Einzelbeobachtungen und für alle Klassen der gleiche, nur die Parameter sind unterschiedlich. Die Funktion ist unimodal und i. allg. nicht symmetrisch. Damit ist eine hohe Flexibilität bei geringem Speicheraufwand gewährleistet. Die Funktion hat eindimensional die Form

$$\mu(u) = a \cdot [1 + (1/b - 1)\,(|u - u_0|/c)^d]^{-1} \,. \tag{2}$$

Sie läßt sich mit den Parametern u_0, a, b, c und d flexibel an die Basisinformationen anpassen.
Die Parameter haben im einzelnen die folgenden inhaltlichen Bedeutungen (Bild 5):

Parameter u_0: Er verkörpert die Lage des Repräsentanten (z. B. des Schwerpunktes) einer Klasse und gleichzeitig des Maximalwertes der Klassenzugehörigkeitsfunktion. An dieser Stelle liegt also das Objekt, das bei großer Betrachtung die Klassenlage repräsentiert.

Parameter a: a ist der Maximalwert der Klassenzugehörigkeitsfunktion. Er gibt Auskunft über die Repräsentativität (das Gewicht) einer Klasse.

Parameter b: Er bezeichnet einen Faktor, der den Zugehörigkeitswert für Objekte an der Klassengrenze c bestimmt

$$\mu(u_0 \pm c_{l,r}) = a \cdot b_{l,r} \,. \tag{3}$$

Bezogen auf u_0 wird zwischen linksseitigem und rechtsseitigem Wert (b_l, b_r) unterschieden.

Parameter c: c gibt den Abstand der noch zur Klasse gehörenden aber am weitesten von u_0 entfernt liegenden Objekte (Randobjekte), gemessen auf den Schwereachsen, an. Für ein Einzelobjekt ist dieser Unschärfeparameter (elementare Unschärfe c_e) eine Zusatzinformation zur (scharfen) Lagebeschreibung. Es gilt

$$c_{l,r} \geqq c_e > 0 \,. \tag{4}$$

Es wird auch hier zwischen einem links- und einem rechtsseitigen Wert unterschieden.

Parameter d: d trägt eine Information über die Objektverteilung in der entsprechenden Klasse, betrachtet in der Projektion der Objekte auf die aktuelle Schweregerade. Er bestimmt die Form der Zugehörigkeitsfunktion, die für $d \to \infty$ in die charakteristische Form der scharfen Klasse übergeht. Es wird auch für d zwischen einem links- und einem rechtsseitigen Wert unterschieden.

Durch die Unterscheidung der Parameter b, c und d links- bzw. rechtsseitig von u_0 läßt sich auch eine Unsymmetrie fassen.
Für die einelementige Menge gilt $a = 1$. Das bedeutet eine Normierung auf das Einzelobjekt. Speziell für diese elementare Zugehörigkeitsfunktion $\mu_e(u)$ gilt

$$\left.\begin{array}{lll} u_0 = u_{0e}\,, & a = a_e = 1\,, & b_l = b_r = b_e = 0{,}5 \\ c_l = c_r = c_e\,, & d_l = d_r = d_e = 2\,. & \end{array}\right\} \tag{5}$$

Sie hat demzufolge die Form

$$\mu_e(u) = [1 + (|u - u_{0e}|/c_e)^2]^{-1} \,. \tag{6}$$

Informationstragende Parameter sind die Lage u_{0e} (scharfe Information) und der Unschärfeparameter c_e. Er bestimmt sich aus der Unschärfe, bei der die Clusterung durchgeführt wurde, Fehlerangaben über die Meßkette, die Merkmalsbildung und möglicherweise subjektiven Angaben. Auch die Leistungsfähigkeit des erarbeiteten Klassifikators spielt hierbei eine Rolle.
Die Beschreibung einer n-dimensionalen Zugehörigkeitsfunktion wird bezüglich der Parameter auf n eindimensionale Funktionen zurückgeführt. Diese werden als Stützzugehörigkeitsfunktionen über den Schwereachsen erklärt. Für die Dimension n gibt es daher prinzipiell keine Beschränkung.

4. Beratungssystem mit unscharfer Klassifikation

In den letzten Jahren wurde ein Rahmensystem auf der Basis der unscharfen Klassifikation [3] entwickelt, das ein *Entwicklungssystem* und eine *Entwurfsstrategie* umfaßt, mit denen seither mehrere konkrete *Einsatzsysteme* entworfen und erprobt wurden. Es ist dadurch charakterisiert, daß es „harte" und „weiche" Informationen verarbeiten kann. Darunter werden verstanden:

- metrisch direkt gemessene oder vorverarbeitete Daten aus dem Problemkreis
- prozedural (funktionell) oder deklarativ formulierte Beziehungen zwischen den Eingangs- und Ausgangsgrößen des Prozesses bzw. Verbindungen der Teilsysteme
- nichtmetrische Informationen, wie subjektiv bestimmte Fakten, menschliche Wahrnehmungen und Einschätzungen, die mittels nominaler oder ordinaler (linguistischer) Skalen beschrieben werden
- Beziehungen, Regeln oder Hypothesen, die nur näherungsweise bekannt sind.

Außer dem wissenschaftlich oder empirisch wohlbegründeten Wissen kann also auch subjektives Expertenwissen aufgenommen, gespeichert und verarbeitet werden. Das so entstandene wissensbasierte Beratungssystem ist in der Lage, unbekannte Objekte, Situationen oder Aufgaben zu identifizieren, d. h. in den Rahmen des bisher Bekannten zu stellen. Damit erfolgt eine Nutzung des bekannten Wissens und die Empfehlung bisher bewährter Lösungen oder geeigneter (sub-)optimaler Prozeßeingriffe. Da die Identifikation unter Angabe des Risikos erfolgt, wobei im speziellen Fall sogar eine Zurückweisung des gestellten Problems erfolgen kann, gibt das Beratungssystem i. allg. mehrere unterschiedlich bewertete Empfehlungen.
Das entwickelte System hat die prinzipielle Struktur wissensbasierter Systeme mit den folgenden Komponenten:

- Wissensaufnahme und Strukturbildung
- Wissensbasis mit Datenbank und Organisationssystem
- Inferenzeinheit
- Dialogteile
- Erklärungskomponenten.

Bild 6 gibt einen Überblick. Die Primärinformationen aus dem Problem bzw. Prozeß und über diesen können metrischer und nichtmetrischer Natur sein. Diese Informationen werden gesammelt und zu Merkmalsvektoren vorverarbeitet (z. B. normiert, geordnet, auf Signifikanz geprüft). Anschließend müssen die Lern- und die Arbeitsphase unterschieden werden. Beide sind voneinander zu trennen, da sowohl der Charakter der zu lösenden Aufgaben (Entwurf bzw. Nutzung) als auch die einzusetzenden Rechner und Software unterschiedlicher Natur sind.
Für den Klassifikatorentwurf in der *Lernphase* steht ein FORTRAN-Programmsystem in einer ESER- und einer SKR- (speziell SM4-) Variante zur Verfügung [4]. Diese Programmsysteme

sind modular aufgebaut und haben eine nutzerfreundliche Kommandowortsteuerung. Für die Nutzung in der *Arbeitsphase* existieren in Abhängigkeit von den speziellen Gerätekonfigurationen mehrere Versionen von Mikrorechnerprogrammen (z. B. für 8-bit-Mikroprozessorsysteme, PC 1715 oder HP 9845). Der in der Lernphase entworfene Klassifikator wird dem Mikrorechner als Parametersatz übergeben. Er stellt das komprimiert und strukturiert gespeicherte Wissen dar. Dieses Einsatzsystem wird dann i. allg. durch eine Person genutzt, die nicht über die Fähigkeiten, Fertigkeiten und Erfahrungen verfügen kann, die zum Aufbau des speziellen Beratungssystems erforderlich waren. Das System liefert risikobewertete Empfehlungen für Entscheidungen. In sehr riskanten Fällen kann das System erneut (mit aktualisierten Primärinformationen) befragt werden.
Folgende Einsatzmöglichkeiten wurden realisiert:

1. Off-line-Betrieb mit Zwischenspeicherung von Prozeßsignalen, Zusatzinformationen, gesonderten Signalanalysen usw. und der risikobewerteten Identifikation mit einem oder mehreren Klassifikatoren sowie der Angaben von Empfehlungen für Prozeßeingriffe
2. On-line-Betrieb mit automatischer Meßwerterfassung, Merkmalsbildung, Berücksichtigung von Kontextinformationen und Angabe von risikobewerteten Empfehlungen für Prozeßeingriffe.

Die zu modellierenden Systeme lassen aufgrund ihres Aufbaus aus Subsystemen Strukturierungen auch auf der Modellebene zu bzw. erfordern diese geradezu. Die Gesichtspunkte können dabei unterschiedlicher Natur sein, beispielsweise lokaler, organisatorischer, ökonomischer, stofflicher, energetischer, funktionell-informatorischer oder steuerungstechnischer Natur. Die Erweiterung des Klassifikatorgedankens auf Klassifikatornetze [5] hat zur Ausarbeitung der Grundlage und ersten praktischen Erfahrungen in dieser Richtung geführt. Es existiert gegenwärtig die Möglichkeit, planare, d. h. parallele und sequentielle Klassifikatoranordnungen zu bearbeiten. Dabei wird die risikobewertete Aussage eines Klassifikators für ein vorgeführtes Objekt dahingehend ausgewertet, daß ein nächster Klassifikator (oder auch mehrere) aufgerufen werden. Anders ausgedrückt handelt es sich um Graphen, deren Knoten Klassifikatoren (beruhend auf spezifischen Merkmalen) sind. Die Kanten werden durch das aktuelle Identifikationsergebnis eines Objekts bewertet. Die wesentlichsten Vorteile solcher Netze liegen in folgendem:

- Es kann eine problemrelevante Modellierung erfolgen.
- Jeder Einzelklassifikator kann durch relativ wenige Merkmale beschrieben werden (insbesondere durch die beiden signifikantesten). Das bringt eine Ersparnis an Rechenaufwand, bei einer gegebenen Objektzahl eine bessere relative statistische Absicherung der Klassen und bessere Dialogmöglichkeiten (z. B. bei der grafischen Darstellung).
- Bei ausreichend gutem Klassifikationsergebnis kann die sequentielle Bearbeitung abgebrochen werden.
- Die in jedem Klassifikator entstehenden Klassenstrukturen werden übersichtlicher und vereinfachen sich, da Substrukturen in nachfolgende Klassifikatoren verschoben werden.
- Es entsteht eine zusätzliche Möglichkeit der Wissenserweiterung und -strukturierung durch Modifikation (Erweiterung, Streichung, Änderung der Verschaltungen) innerhalb des Netzes.

Für den Entwurf sinnvoller und effektiver Netzstrukturen werden gegenwärtig zwei Wege gesehen:

1. Der Entwurf durch den Experten (Fachmann, Lehrer)
   Es sind dabei unterschiedliche Blickwinkel denkbar, die in einem Netz zu parallelen Zweigen zusammengefaßt werden können. Sequentielle Anordnungen folgen aus zunehmend differenzierteren Betrachtungen oder mit fortschreitender Zeit.
2. Der Entwurf ohne Experten (formale Strukturbildung)
   Möglichkeiten sind:
   - hierarchische, iterative oder gekoppelte Clusteralgorithmen
   - Einteilung eines gegebenen Merkmalssatzes zu Gruppen mit unterschiedlicher Signifikanz.

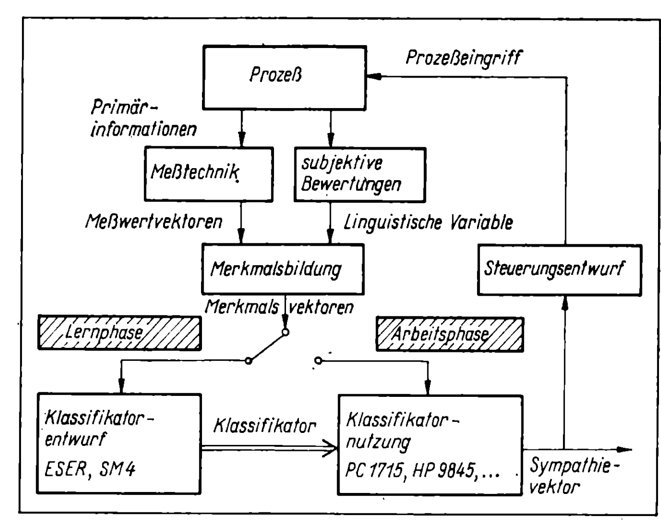


Bild 6. Struktur des Beratungssystems mit unscharfer Klassifikation

5. Anwendungsmöglichkeiten

Die vorgestellte Methodik ist nicht auf spezielle lineare oder nichtlineare Zusammenhänge festgelegt. Sie hat demzufolge breite Einsatzmöglichkeiten. Fertiggestellte und noch in Bearbeitung befindliche Systeme liegen in folgenden Gebieten:

- Komprimierte und rationelle Speicherung (z. B. in Mikrorechnern) eines umfangreichen Datenmaterials mit einem flexibel anpaßbaren Klassenkonzept
- Situationsanalyse in der technischen Diagnostik und Prozeßüberwachung, beispielsweise der Identifikation des aktuellen Verschleißgrades von Tragrollen, wie sie in Bandförderanlagen, z. B. in Braunkohletagebauen, eingesetzt werden [6], oder der Identifikation der aktuellen Schneidigkeit zerspanender Werkzeuge bei numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen
- Unterstützung des medizinischen Diagnoseprozesses, beispielsweise bei der Früherkennung und Differentialdiagnostik von Erkrankungen der weiblichen Brustdrüse auf der Basis von Röntgenbildern (Mammogramme), die vom Arzt nach bestimmten Richtlinien interpretiert wurden [7]
- Gütebewertung von Erzeugnissen oder Situationen komplexer Fertigungsprozesse auf der Grundlage gemessener Kennwerte und subjektiver Bewertungen von Bedienern mit dem Ziel der Qualitätskontrolle, der durchgängigen Qualitätsanalyse oder zum Zwecke von Weltstandsvergleichen sowie der Zuordnung von Entscheidungsempfehlungen
- Typisierung von Zeitreihen, d. h. Bildung und Beschreibung von Reaktionstypen, auf die eine Vorhersage noch nicht abgeschlossener Übergangsvorgänge gegründet werden kann [8]
- Adaptive Steuerung nach einem Zuordnerprinzip, d. h. der Wahl einer Steuerstrategie oder günstiger Reglerparameter auf der Basis der Identifikation der aktuellen Prozeßsituation.

Abschließende Betrachtungen

Grundlage des vorgestellten Rahmensystems für die Beratung ist die Zusammenführung der Grundgedanken der Klassifikation und der unscharfen Mengen. Diese Richtung wird bereits seit über 10 Jahren betrieben und wurde wesentlich durch die Arbeit innerhalb der von Prof. *M. Peschel* ins Leben gerufenen Working Group for Fuzzy Sets and Systems angeregt und befruchtet [9] bis [11]. Der gegenwärtige Stand umfaßt die statische Situationsanalyse und Anfänge dynamischer Betrachtungen. Zukünftig werden weitere Fortschritte bei der Behandlung sehr umfangreicher Problemstellungen (z. B. Spektrenvergleiche), der verstärkten Bearbeitung dynamischer Fragestellungen insbesondere zur Prognose (z. B. bei evolutionären Systemen) oder der Modellierung mittels umfangreicher (drei- und höherdimensionaler) Klassifikatornetze gesehen. Neben der Vervollkommnung der

rechentechnischen Instrumente mit gegenwärtigen Rechnerstrukturen erwachsen aber gerade aus den unscharfen Klassifikatornetzen spezifische Anforderungen an Prozessorstrukturen.

Literatur

[1] *Wernstedt, J.*: Methoden und Erfahrungen zur Prozeßsteuerung und Entscheidungsfindung durch den Menschen auf der Grundlage von Beratungs-/Expertensystemen. msr, Berlin 28 (1985) 7, S. 295–298.
[2] *Zadeh, L. A.*: Fuzzy Sets. Inf. and Control 8 (1965) S. 338–353.
[3] *Bocklisch, S. F.*: Experimentelle Prozeßanalyse mit unscharfer Klassifikation. Dissertation B, TH Karl-Marx-Stadt 1981.
[4] Programmsystem zur unscharfen Klassifikation. Nutzerhandbuch. Akademie der Wissenschaften der DDR, Institut für Mechanik, Karl-Marx-Stadt 1987.
[5] *Bocklisch, S. F.; Priber, U.*: Ein Netz unscharfer Klassifikatoren als Diagnosesystem. Wiss. Zeitschrift der TH Karl-Marx-Stadt 25 (1983) S. 711 bis 716.
[6] *Bocklisch, S. F.*: Diagnose mit unscharfer Klassifikation. In: Beiträge zur Maschinen- und Anlagendiagnostik (Report). Akademie der Wissenschaften der DDR, Institut für Mechanik, Karl-Marx-Stadt 1985, S. 88–123.
[7] *Schiller, W.; Bocklisch, S. F.; Kunzelmann, F.*: DIDIMA – ein medizinisches Expertensystem mit unscharfem Systemkonzept. Schriftenreihe Dokumentation/Information, Heft 66, TH Ilmenau 1985, S. 180–188.
[8] *Bocklisch, S. F.; Kim Gwang Jong*: Diagnostic Forecasting Based on Fuzzy Prototypes. XIth Polish Conference on the Theory of Machines and Mechanisms, Zakopane 1987.
[9] Fortschrittsberichte der GDR Working Group for Fuzzy Sets and Systems. Band I–VI, TH Karl-Marx-Stadt, 1977 bis 1983.
[10] *Peschel, M.; Bocklisch, S. F.* (Hrsg.): Unscharfe Modellbildung und Steuerung – Ergebnisse eines interdisziplinären Seminars. Wiss. Schriftenreihe der TH Karl-Marx-Stadt 13/1982.
[11] *Bocklisch, S. F.; Orlovski, S.; Peschel, M.; Nishiwaki, Y.* (eds.): Fuzzy Sets Applications, Methodological Approaches and Results. Berlin: Akademie-Verlag 1986.

msr 8686

G. Bretthauer; S. Römer

Programmpaket zur Identifikation rückgekoppelter Mehrgrößensysteme im Frequenzbereich auf den Kleinrechnern K 1630 und SM 4-20

0. Einleitung

Der Identifikation rückgekoppelter Mehrgrößensysteme wird gegenwärtig große Aufmerksamkeit geschenkt. Als Gründe hierfür sind zu nennen:

– Eine Vielzahl von realen Systemen haben mehrere Eingangs- und Ausgangsgrößen, die miteinander gekoppelt sind und nicht in eine entsprechende Anzahl von Eingrößensysteme zerlegbar sind.
– In vielen technischen Systemen ist die mehrvariable Regelstrecke Bestandteil eines Mehrgrößenregelkreises, der aus Gründen der Sicherheit (Stabilität), der Wirtschaftlichkeit oder der Funktionsfähigkeit nicht getrennt werden darf, so daß die Identifikation unter normalen Betriebsbedingungen, d. h. im geschlossenen Regelkreis, durchzuführen ist.
– Bei zahlreichen nichttechnischen Systemen ist die mehrvariable Regelstrecke Bestandteil eines größeren komplexen Systems, in dem Rückführungen enthalten sind, die wegen der weiteren Arbeitsfähigkeit des Gesamtsystems nicht beseitigt werden dürfen.

Die bisher entwickelten Identifikationsverfahren lassen sich bezüglich der prinzipiellen Vorgehensweise bei der Bestimmung der unbekannten Mehrgrößenregelstrecke in vier Gruppen einteilen [1] und [2]:

1. Indirekte Methode
2. Direkte Methode
3. Korrelationsmethode
4. Verbundprozeßmethode.

Für parametrische Modelle sind die entsprechenden Lösungsbeziehungen z. B. in [1] und [3] bis [6], für nichtparametrische Modelle in [2] und [7] bis [9] zu finden.
Die nichtparametrischen Frequenzgangmodelle weisen dabei eine Reihe von Vorteilen gegenüber den parametrischen Modellen in Form von Vektordifferenzengleichungen bzw. Zustandsgleichungen auf. Dazu gehören:

– Die nichtparametrischen Frequenzgangmodelle sind oftmals physikalisch anschaulich und vermitteln dem Entwurfsingenieur ein Bild über das dynamische Verhalten des betrachteten Systems.
– Bei den nichtparametrischen Frequenzgangmodellen wird das bei parametrischen Modellen stets auftretende „Strukturproblem" umgangen.
– Bei der Verwendung nichtparametrischer Frequenzgangmodelle hängt die Dimension der bei den verschiedenen Identifikationsmethoden zu invertierenden Matrizen nur von der Anzahl der Eingangs- und Ausgangsgrößen und nicht von den Ordnungen der Teilregelstrecken ab. Dadurch treten weniger numerische Schwierigkeiten bei der rechentechnischen Realisierung auf.
– Die Untersuchungen zur Modellgenauigkeit von ein- und mehrvariablen Systemen zeigten, daß Fehlerbetrachtungen zweckmäßigerweise im Frequenzbereich durchzuführen sind [10] und [11]. Damit kommt der direkten Ermittlung von Frequenzgangmatrizen eine besondere Bedeutung zu.
– Für den Entwurf von Mehrgrößenregelungen existieren moderne Syntheseverfahren im Frequenzbereich [12] und [13], so daß ein direkter Anschluß der Identifikationsergebnisse an den Entwurfsprozeß möglich ist.

Die Ermittlung nichtparametrischer Frequenzgangmodelle geschieht in zwei Schritten:

1. Berechnung der entsprechenden Auto- und Kreuzspektraldichtematrizen aus den jeweils gemessenen Signalvektoren
2. Bestimmung der Frequenzgangmatrix der unbekannten Mehrgrößenregelstrecke aus den im ersten Schritt berechneten Spektraldichtematrizen.

Für den ersten Schritt existieren die beiden Berechnungswege

– Berechnung der Spektraldichtematrizen aus den gemessenen Signalvektoren (direkter Weg), z. B. $\boldsymbol{S}_{uu}(j\omega)$ aus $\boldsymbol{u}(t)$
– Berechnung der Spektraldichtematrizen aus den entsprechenden Korrelationsmatrizen (indirekter Weg), z. B. $\boldsymbol{S}_{uu}(j\omega)$ aus $\boldsymbol{R}_{uu}(\tau)$. Die Korrelationsmatrizen werden zuvor aus den gemessenen Signalvektoren bestimmt.

Für beide Wege sind entsprechende Digitalrechnerprogramme in verschiedenen Programmpaketen für die Signalanalyse (s. [14] und [15]) enthalten. Mit ihrer Hilfe lassen sich die für die Identifikation der unbekannten Mehrgrößenregelstrecke benötigten Auto- und Kreuzspektraldichtematrizen berechnen.
Für die Identifikation rückgekoppelter Mehrgrößensysteme wurde in Zusammenarbeit zwischen der TU Dresden, Sektion 9, Bereich Regelungstechnik und Prozeßsteuerung, und dem Zentralinstitut für Kybernetik und Informationsprozesse der AdW, Bereich Regelungssysteme, auf den Kleinrechnern K 1630 und SM 4-20 ein Programmpaket in der Programmiersprache PASCAL-2 zur Berechnung nichtparametrischer Frequenzgangmodelle aufgebaut. Dabei wurde vorausgesetzt, daß entweder die Auto- und Kreuzkorrelationsmatrizen oder die Auto- und Kreuzspektraldichtematrizen gegeben sind. Dieses Programmpaket wird vorgestellt.

Dr. sc. techn. *Georg Bretthauer* (40) erlernte den Beruf eines Maschinenbauers. Von 1965 bis 1970 studierte er Regelungstechnik an der TU Dresden. Seit 1970 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Zentralinstitut für Kybernetik und Informationsprozesse der AdW der DDR, Institutsteil Dresden, 1977 Promotion A, 1983 Promotion B.

Dipl.-Ing. *Steffen Römer* (26) studierte von 1982 bis 1987 an der Sektion Informationstechnik, Bereich Regelungstechnik und Prozeßsteuerung, der TU Dresden. Seit März 1987 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Zentralinstitut für Kybernetik und Informationsprozesse der AdW der DDR, Bereich rechnergestützte Produktion und Produktionsvorbereitung.

1. Beschreibung der Identifikationsmethoden

Voraussetzung für die Anwendung des Programmpakets ist ein stabiler Mehrgrößenregelkreis (Bild 1), der aus einer linearen, zeitinvarianten, mehrvariablen Regelstrecke und einem ebenfalls linearen, zeitinvarianten Mehrgrößenregler besteht.
$\boldsymbol{u}(t)$, $\boldsymbol{y}(t)$, $\boldsymbol{u}_{\mathrm{R}}(t)$ und $\boldsymbol{y}_{\mathrm{R}}(t)$ stellen innere bzw. Kreissignale dar, während $\boldsymbol{v}_{\mathrm{S}}(t)$, $\boldsymbol{v}_{\mathrm{R}}(t)$, $\boldsymbol{w}_{\mathrm{S}}(t)$ und $\boldsymbol{w}_{\mathrm{R}}(t)$ von außen auf den Mehrgrößenregelkreis einwirkende Stör- bzw. Testsignale sind, die nicht alle vorhanden sein müssen. Für $\boldsymbol{v}_{\mathrm{S}}(t)$, $\boldsymbol{v}_{\mathrm{R}}(t)$, $\boldsymbol{w}_{\mathrm{S}}(t)$ und $\boldsymbol{w}_{\mathrm{R}}(t)$ wird dabei vorausgesetzt, daß sie paarweise unkorreliert sind, d. h. die Kreuzkorrelationsmatrizen zwischen je zwei dieser Signalvektoren bzw. die entsprechenden Kreuzspektraldichtematrizen verschwinden.
Weiterhin wird angenommen, daß die Störsignalvektoren $\boldsymbol{v}_{\mathrm{S}}(t)$ und $\boldsymbol{v}_{\mathrm{R}}(t)$ aus den n- bzw. m-dimensionalen stationären, mittelwertfreien weißen Rauschprozessen $\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{S}}(t)$ und $\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{R}}(t)$ über die beiden Formfilter mit den Frequenzgangmatrizen

$$\boldsymbol{G}_{\varepsilon\mathrm{S}}(j\omega) = (G_{\varepsilon_{\mathrm{S}_{ik}}}(j\omega)) \qquad (i, k = 1, \dots, n),$$

$$\boldsymbol{G}_{\varepsilon\mathrm{R}}(j\omega) = (G_{\varepsilon_{\mathrm{R}_{ik}}}(j\omega)) \qquad (i, k = 1, \dots, m)$$

entstehen.
Die unbekannte mehrvariable Regelstrecke wird im Frequenzbereich durch die Frequenzgangmatrix

$$\boldsymbol{G}_{\mathrm{S}}(j\omega) = (G_{\mathrm{S}_{ik}}(j\omega)) \qquad (i = 1, \dots, n;\ k = 1, \dots, m)$$

und der entsprechende Regler durch die Frequenzgangmatrix

$$\boldsymbol{G}_{\mathrm{R}}(j\omega) = (G_{\mathrm{R}_{ik}}(u\omega)) \qquad (i = 1, \dots, m;\ k = 1, \dots, n)$$

beschrieben.
Mit $\boldsymbol{G}^{*}(j\omega)$ wird die konjugiert komplexe Matrix, mit $\boldsymbol{G}^{T}(j\omega)$ die transponierte Matrix und mit $(\boldsymbol{G}(j\omega))^{-1}$ die inverse Matrix von $\boldsymbol{G}(j\omega)$ bezeichnet.
Für den geschlossenen Mehrgrößenregelkreis wird ferner vorausgesetzt, daß die Matrizen

$$(\boldsymbol{I}_{\mathrm{n}} + \boldsymbol{G}_{\mathrm{S}}(j\omega)\,\boldsymbol{G}_{\mathrm{R}}(j\omega))^{-1}$$

und

$$(\boldsymbol{I}_{\mathrm{m}} + \boldsymbol{G}_{\mathrm{R}}(j\omega)\,\boldsymbol{G}_{\mathrm{S}}(j\omega))^{-1}$$

mit $\boldsymbol{I}_{\mathrm{n}}$ bzw. $\boldsymbol{I}_{\mathrm{m}}$ als (n, n)- bzw. (m, m)-Einheitsmatrix existieren.
Die Ermittlung der unbekannten Frequenzgangmatrix $\boldsymbol{G}_{\mathrm{S}}(j\omega)$ erfolgt durch die Auswertung gemessener Signalvektoren des Mehrgrößenregelkreises. In Abhängigkeit von den dabei verwendeten Signalvektoren und der notwendigen A-priori-Information werden die folgenden Identifikationsmethoden unterschieden.

Indirekte Methode

Gemessen werden $\boldsymbol{w}_{\mathrm{S}}(t)$ und $\boldsymbol{y}(t)$. Vorausgesetzt wird, daß $\boldsymbol{G}_{\mathrm{R}}(j\omega)$ a priori bekannt ist.
Aus den gemessenen Signalvektoren $\boldsymbol{w}_{\mathrm{S}}(t)$ und $\boldsymbol{y}(t)$ werden die Auto- und Kreuzspektraldichtematrizen

$$\boldsymbol{S}_{\mathrm{w_S w_S}}(j\omega)\,, \qquad \boldsymbol{S}_{\mathrm{w_S y}}(j\omega)$$

berechnet. Sie enthalten die Information über die unbekannte Frequenzgangmatrix $\boldsymbol{G}_{\mathrm{S}}(j\omega)$. Hierfür wird die folgende Lösungsbeziehung erhalten [2]:

$$\boldsymbol{G}_{\mathrm{S}}^{T}(j\omega) = (\boldsymbol{S}_{\mathrm{w_S w_S}}(j\omega) - \boldsymbol{S}_{\mathrm{w_S y}}(j\omega)\,\boldsymbol{G}_{\mathrm{R}}^{T}(j\omega))^{-1}\,\boldsymbol{S}_{\mathrm{w_S y}}(j\omega)\,. \quad (1)$$

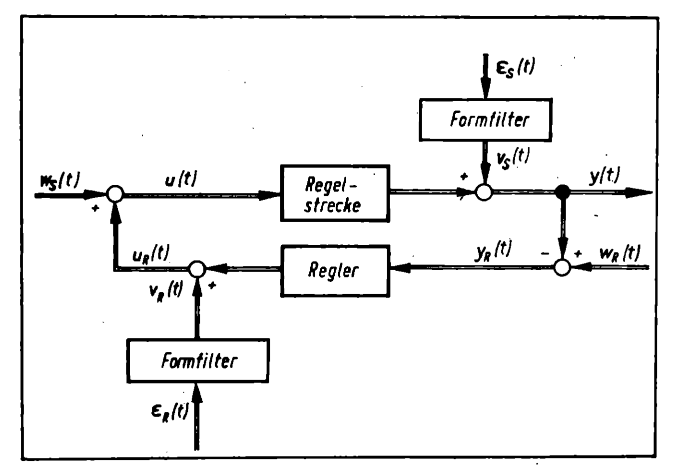


Bild 1. Mehrgrößenregelkreis

$\boldsymbol{u}(t)$ Vektor der m Eingangssignale der Regelstrecke; $\boldsymbol{y}(t)$ Vektor der n Ausgangssignale der Regelstrecke; $\boldsymbol{y}_{\mathrm{R}}(t)$ Vektor der n Eingangssignale des Reglers; $\boldsymbol{u}_{\mathrm{R}}(t)$ Vektor der m Ausgangssignale des Reglers; $\boldsymbol{v}_{\mathrm{S}}(t)$ Vektor der n Störsignale am Ausgang der Regelstrecke; $\boldsymbol{v}_{\mathrm{R}}(t)$ Vektor der m Störsignale am Ausgang des Reglers; $\boldsymbol{w}_{\mathrm{S}}(t)$ Vektor der m Testsignale am Eingang der Regelstrecke; $\boldsymbol{w}_{\mathrm{R}}(t)$ Vektor der n Führungssignale am Eingang des Reglers

Korrelationsmethode

Gemessen werden $\boldsymbol{w}_{\mathrm{S}}(t)$, $\boldsymbol{u}(t)$ und $\boldsymbol{y}(t)$. Es ist keine A-priori-Kenntnis über $G_{\mathrm{R}}(j\omega)$ notwendig.
Aus den gemessenen Signalvektoren $\boldsymbol{w}_{\mathrm{S}}(t)$, $\boldsymbol{u}(t)$ und $\boldsymbol{y}(t)$ werden die Kreuzspektraldichtematrizen

$$\boldsymbol{S}_{\mathrm{w_S u}}(j\omega),\ \boldsymbol{S}_{\mathrm{w_S y}}(j\omega),$$

berechnet. Hiermit ergibt sich für die unbekannte Frequenzgangmatrix die Lösungsbeziehung [2]

$$\boldsymbol{G}_{\mathrm{S}}^{T}(j\omega) = (\boldsymbol{S}_{\mathrm{w_S u}}(j\omega))^{-1}\,\boldsymbol{S}_{\mathrm{w_S y}}(j\omega)\,. \quad (3)$$

Verbundprozeßmethode

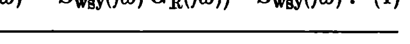
Genau wie bei der direkten Methode werden wieder $\boldsymbol{u}(t)$ und $\boldsymbol{y}(t)$ gemessen. Außerdem wird vorausgesetzt, daß

- $\boldsymbol{w}_{\mathrm{S}}(t) = 0$ und $\boldsymbol{w}_{\mathrm{R}}(t) = 0$
- $\boldsymbol{G}_{\mathrm{S}}(j\infty)\,\boldsymbol{G}_{\mathrm{R}}(j\infty) = 0$
- $\boldsymbol{G}_{\varepsilon\mathrm{S}}(j\infty) = \boldsymbol{I}_{\mathrm{n}}$ und $\boldsymbol{G}_{\varepsilon\mathrm{R}}(j\infty) = \boldsymbol{I}_{\mathrm{m}}$
- $(\boldsymbol{G}_{\varepsilon\mathrm{S}}(j\omega))^{-1}$ und $(\boldsymbol{G}_{\varepsilon\mathrm{R}}(j\omega))^{-1}$ existieren
- der aus $\boldsymbol{u}(t)$ und $\boldsymbol{y}(t)$ gebildete Verbundprozeß $\boldsymbol{y}_{\mathrm{v}}(t)$ ein stationärer, mittelwertfreier stochastischer Prozeß mit vollem Rang ist.

Im Unterschied zu den drei vorhergehenden Methoden werden hier nicht nur die Frequenzgangmatrix $\boldsymbol{G}_{\mathrm{S}}(j\omega)$, sondern auch die Frequenzgangmatrix $\boldsymbol{G}_{\mathrm{R}}(j\omega)$ und die Frequenzgangmatrizen $\boldsymbol{G}_{\varepsilon\mathrm{S}}(j\omega)$ und $\boldsymbol{G}_{\varepsilon\mathrm{R}}(j\omega)$ der beiden Störfilter ermittelt.
Dazu wird aus den gemessenen Signalvektoren $\boldsymbol{u}(t)$ und $\boldsymbol{y}(t)$ die Spektraldichtematrix $\boldsymbol{S}_{\mathrm{y_v y_v}}(j\omega)$ des Verbundprozesses $\boldsymbol{y}_{\mathrm{v}}(t)$ berechnet. Hierfür gilt:

$$\boldsymbol{S}_{\mathrm{y_v y_v}}(j\omega) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{S}_{\mathrm{yy}}(j\omega) & \boldsymbol{S}_{\mathrm{yu}}(j\omega) \\ \boldsymbol{S}_{\mathrm{uy}}(j\omega) & \boldsymbol{S}_{\mathrm{uu}}(j\omega) \end{bmatrix} = \boldsymbol{G}_{\mathrm{v}}^{*}(j\omega)\,\boldsymbol{S}_{\varepsilon_{\mathrm{v}}\varepsilon_{\mathrm{v}}}(j\omega)\,\boldsymbol{G}_{\mathrm{v}}^{T}(j\omega) \quad (4)$$

mit



$$\boldsymbol{G}_{\mathrm{v}}(j\omega) = \begin{bmatrix} (\boldsymbol{I}_{\mathrm{n}} + \boldsymbol{G}_{\mathrm{S}}(j\omega)\,\boldsymbol{G}_{\mathrm{R}}(j\omega))^{-1}\,\boldsymbol{G}_{\varepsilon\mathrm{S}}(j\omega) & (\boldsymbol{I}_{\mathrm{n}} + \boldsymbol{G}_{\mathrm{S}}(j\omega)\,\boldsymbol{G}_{\mathrm{R}}(j\omega))^{-1}\,\boldsymbol{G}_{\mathrm{S}}(j\omega)\,\boldsymbol{G}_{\varepsilon\mathrm{R}}(j\omega) \\ -(\boldsymbol{I}_{\mathrm{m}} + \boldsymbol{G}_{\mathrm{R}}(j\omega)\,\boldsymbol{G}_{\mathrm{S}}(j\omega))^{-1}\,\boldsymbol{G}_{\mathrm{R}}(j\omega)\,\boldsymbol{G}_{\varepsilon\mathrm{S}}(j\omega) & (\boldsymbol{I}_{\mathrm{m}} + \boldsymbol{G}_{\mathrm{R}}(j\omega)\,\boldsymbol{G}_{\mathrm{S}}(j\omega))^{-1}\,\boldsymbol{G}_{\varepsilon\mathrm{R}}(j\omega) \end{bmatrix} \quad (5)$$

Direkte Methode

Gemessen werden $\boldsymbol{u}(t)$ und $\boldsymbol{y}(t)$. Vorausgesetzt wird wieder die A-priori-Kenntnis von $\boldsymbol{G}_{\mathrm{R}}(j\omega)$.
Aus den gemessenen Signalvektoren $\boldsymbol{u}(t)$ und $\boldsymbol{y}(t)$ werden die Auto- und Kreuzspektraldichtematrizen

$$\boldsymbol{S}_{\mathrm{uu}}(j\omega),\ \boldsymbol{S}_{\mathrm{uy}}(j\omega),\ \boldsymbol{S}_{\mathrm{yy}}(j\omega)$$

berechnet. Für die unbekannte Frequenzgangmatrix wird dabei die Lösungsbeziehung

$$\boldsymbol{G}_{\mathrm{S}}^{T}(j\omega) = (\boldsymbol{S}_{\mathrm{uu}}(j\omega) + \boldsymbol{G}_{\mathrm{R}}^{*}(j\omega)\,\boldsymbol{S}_{\mathrm{yu}}(j\omega))^{-1}\,(\boldsymbol{S}_{\mathrm{yu}}(j\omega) + {} + \boldsymbol{G}_{\mathrm{R}}^{*}(j\omega)\,\boldsymbol{S}_{\mathrm{yy}}(j\omega)) \quad (2)$$

erhalten [2].

und

$$\boldsymbol{S}_{\varepsilon_{\mathrm{v}}\varepsilon_{\mathrm{v}}}(j\omega) = \boldsymbol{I}_{\mathrm{n+m}}\,. \quad (6)$$

$\boldsymbol{G}_{\mathrm{v}}(j\omega)$ stellt dabei die Frequenzgangmatrix des Verbundprozesses dar. Aus dieser werden die unbekannten Frequenzgangmatrizen $\boldsymbol{G}_{\mathrm{S}}(j\omega)$, $\boldsymbol{G}_{\mathrm{R}}(j\omega)$, $\boldsymbol{G}_{\varepsilon\mathrm{S}}(j\omega)$ und $\boldsymbol{G}_{\varepsilon\mathrm{R}}(j\omega)$ wie folgt berechnet [2]:

$$\boldsymbol{G}_{\mathrm{S}}^{T}(j\omega) = (\boldsymbol{G}_{\mathrm{v}_{22}}^{T}(j\omega))^{-1}\,\boldsymbol{G}_{\mathrm{v}_{12}}^{T}(j\omega)\,, \quad (7)$$

$$\boldsymbol{G}_{\mathrm{R}}^{T}(j\omega) = -(\boldsymbol{G}_{\mathrm{v}_{11}}^{T}(j\omega))^{-1}\,\boldsymbol{G}_{\mathrm{v}_{21}}^{T}(j\omega)\,, \quad (8)$$

$$\boldsymbol{G}_{\varepsilon\mathrm{S}}^{T}(j\omega) = \boldsymbol{G}_{\mathrm{v}_{11}}^{T}(j\omega) - \boldsymbol{G}_{\mathrm{v}_{21}}^{T}(j\omega)\,\boldsymbol{G}_{\mathrm{S}}^{T}(j\omega)\,, \quad (9)$$

$$\boldsymbol{G}_{\varepsilon\mathrm{R}}^{T}(j\omega) = \boldsymbol{G}_{\mathrm{v}_{22}}^{T}(j\omega) - \boldsymbol{G}_{\mathrm{v}_{12}}^{T}(j\omega)\,\boldsymbol{G}_{\mathrm{R}}^{T}(j\omega)\,. \quad (10)$$

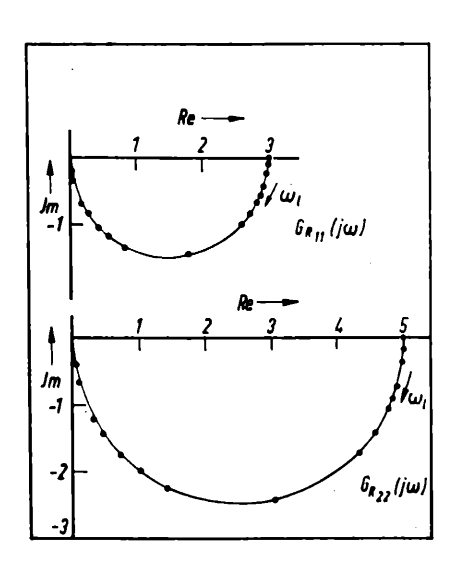


Bild 2. Frequenzgangmatrix $G_R(j\omega_l)$ des Reglers ($G_{R_{12}}(j\omega) = G_{R_{21}}(j\omega) = 0$)

(1) bis (3) und (7) bilden die Grundlage für die Identifikation der unbekannten Mehrgrößenregelstrecke im Frequenzbereich in Abhängigkeit von den jeweils gemessenen Signalvektoren und der zur Verfügung stehenden A-priori-Information. Voraussetzung dafür ist die Kenntnis der entsprechenden Auto- und Kreuzspektraldichtematrizen, die entweder gegeben ist oder bei Vorgabe der Auto- und Kreuzkorrelationsmatrizen mit einem gesonderten Programm zur Fourier-Transformation innerhalb des Programmpakets berechnet werden. Die Glättung der Spektraldichten erfolgt dabei mit einem Hanning-Filter [16].

2. Aufbau und Arbeitsweise des Programmpakets

Das Programmpaket besteht aus

- dem Steuerprogramm
- Hilfsprogrammen zur Datenbehandlung
- den vier Identifikationsprogrammen.

Das *Steuerprogramm* ist ein Dialogprogramm, das die Handhabung der Identifikationsprogramme und der Hilfsprogramme unterstützt. Es gestattet die Anwendung des Programmpakets ohne die Kenntnis spezieller Rechnerkommandos. Über ein Bildschirmmenü ist dabei die Auswahl eines beliebigen Programms aus dem Gesamtpaket möglich.
Die *Hilfsprogramme* unterstützen die Arbeit mit den verschiedenen Datenfiles. Sie ermöglichen eine einfache und schnelle Editierung der einzelnen Datenfiles. Zu den Hilfsprogrammen zählt auch das Programm zur Berechnung der entsprechenden Spektraldichtematrizen aus den vorgegebenen Korrelationsmatrizen.
Die *Identifikationsprogramme* bilden den Hauptteil des Programmpakets. Sie gestatten die Ermittlung nichtparametrischer Frequenzgangmodelle für die unbekannte Regelstrecke von Mehrgrößenregelkreisen. Dafür stehen die im Abschn. 1. beschriebenen vier Identifikationsmethoden

- Indirekte Methode (IDM)
- Direkte Methode (DM)
- Korrelationsmethode (KM)
- Verbundprozeßmethode (VPM)

zur Verfügung.
Als Eingabewerte für die einzelnen Methoden werden die Auto- und Kreuzspektraldichtematrizen der jeweils gemessenen Signalvektoren und bei der indirekten Methode sowie der direkten Methode zusätzlich die Frequenzgangmatrix des Reglers benötigt (siehe Abschn. 1.). Die Auto- und Kreuzspektraldichtematrizen sowie die Frequenzgangmatrizen liegen dabei in nichtparametrischer Form für diskrete Werte ω_l ($l = 1, \dots, N$) vor.
Da der verwendete Faktorisierungsalgorithmus [17] von einer Spektraldichtematrix in parametrischer Form ausgeht (s. Beispiel 3), werden die gemessenen diskreten Werte der einzelnen Spektraldichten zuerst approximiert. Hierfür ist z. B. der in [11] angegebene Algorithmus verwendbar.

Arbeitsablauf

Zu Beginn wird in Abhängigkeit von den gemessenen Signalvektoren und der vorhandenen A-priori-Information die spezielle Identifikationsmethode ausgewählt. Danach werden im rechnergeführten Dialog die Dimensionen abgefragt, und es erfolgt die Eingabe der entsprechenden Auto- und Kreuzspektraldichtematrizen sowie, falls erforderlich, die Eingabe der Reglerfrequenzgangmatrix. Diese Eingabe geschieht entweder manuell oder über den Aufruf eines bereits abgespeicherten Datenfiles. Anschließend werden die diskreten Werte der Regelstreckenfrequenzgangmatrix berechnet, als Protokoll auf dem Bildschirm oder auf dem Drucker ausgegeben und in Datenfiles abgespeichert. Die vorliegende Version gestattet dabei die Identifikation von Regelstreckenfrequenzgangmatrizen mit einer Dimension von bis zu $m = n = 5$. Mit Ausnahme des Steuerprogramms sind alle Programme in PASCAL-2 (s. [18]) geschrieben.

3. Anwendung des Programmpakets

Die Anwendung des Programmpakets wird nun anhand von drei Beispielen gezeigt.

Beispiel 1: Identifikation einer Zweigrößenregelstrecke nach der indirekten Methode bei vorgegebenen Spektraldichtematrizen

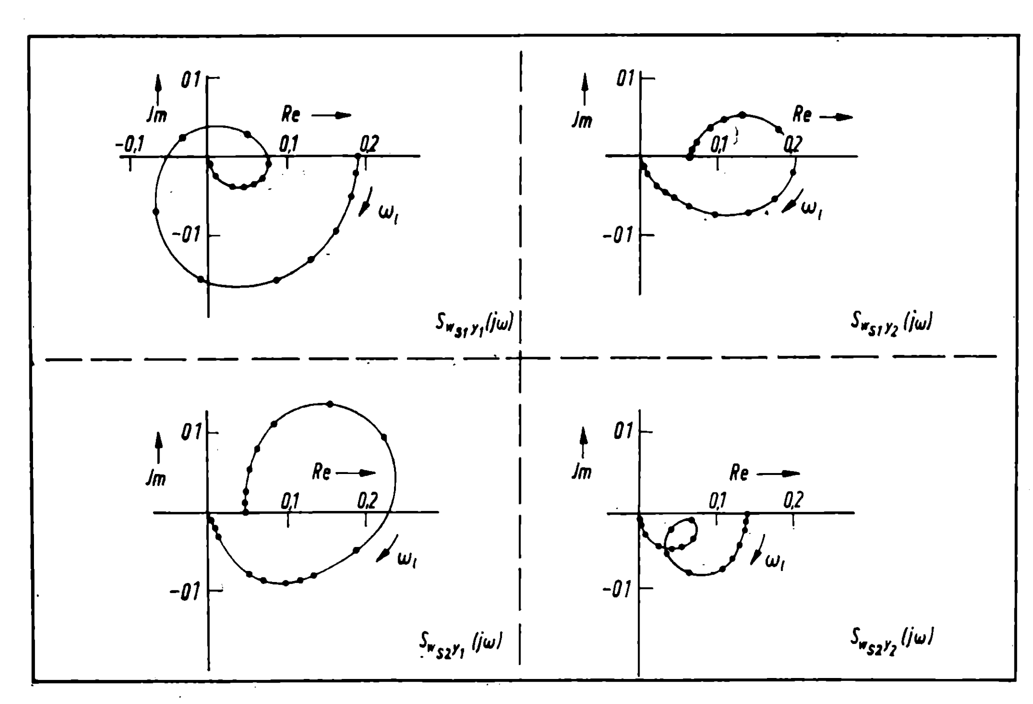


Bild 3. Kreuzspektraldichtematrix $S_{wsy}(j\omega_l)$

Gegeben ist ein Zweigrößenregelkreis nach Bild 1 mit normiertem weißen Rauschen für $\boldsymbol{w}_S(t)$ und den in den Bildern 2 und 3 dargestellten diskreten Werten für die Reglerfrequenzgangmatrix $\boldsymbol{G}_R(j\omega_l)$ und für die Kreuzspektraldichtematrix $\boldsymbol{S}_{wsy}(j\omega_l)$. Die Kreuzspektraldichtematrix wurde dabei auf theoretischem Wege berechnet.

Gesucht sind die diskreten Werte der Frequenzgangmatrix $\boldsymbol{G}_S(j\omega_l)$.

Die Auswertung von (1) mit Hilfe des entwickelten Programmpakets liefert die im Bild 4 dargestellten Ergebnisse für $\boldsymbol{G}_S(j\omega_l)$. Das Beispiel zeigt, daß bereits bei sehr einfachen Mehrgrößensystemen relativ komplizierte Kreuzspektraldichtematrizen $\boldsymbol{S}_{wsy}(j\omega_l)$ auftreten können. Daraus resultieren hohe Anforderungen bezüglich der Genauigkeit der auszuwertenden Spektraldichtematrizen.

Beispiel 2: Identifikation einer Zweigrößenregelstrecke nach der Korrelationsmethode bei experimentell ermittelten Korrelationsmatrizen

Auf dem Analogrechner wurde ein Zweigrößenregelkreis nach Bild 1 mit

$\boldsymbol{w}_S(t) = \boldsymbol{0}$ und $\boldsymbol{v}_R(t) = \boldsymbol{0}$,

$\boldsymbol{w}_R(t)$ PRBS-Folgen

$\boldsymbol{v}_S(t)$ normalverteilte, bandbegrenzte unkorrelierte, weiße Rauschsignale

$$\boldsymbol{G}_S(j\omega) = \begin{bmatrix} \frac{1}{1+200j\omega} & \frac{2}{3+200j\omega} \\ \frac{1}{1+200j\omega} & \frac{1}{1+200j\omega} \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{G}_R(j\omega) = \begin{bmatrix} \frac{3}{1+4j\omega} & 0 \\ 0 & \frac{5}{1+4j\omega} \end{bmatrix}$$

simuliert. Bei einem Stör-Nutzsignal-Verhältnis $\Lambda = 0{,}1$ wurden die in den Bildern 5 und 6 dargestellten Werte für die Kreuzkorrelationsmatrizen $\boldsymbol{R}_{wRu}(\tau)$ und $\boldsymbol{R}_{wRy}(\tau)$ erhalten. Eine ausführliche Versuchsbeschreibung ist in [2] und [19] zu finden.

Gesucht sind die diskreten Werte der Frequenzgangmatrix $\boldsymbol{G}_S(j\omega_l)$.

Hierfür wurden zuerst die jeweiligen Kreuzspektraldichtematrizen $\boldsymbol{S}_{wRu}(j\omega_l)$ und $\boldsymbol{S}_{wRy}(j\omega_l)$ aus den gemessenen Kreuzkorrelationsmatrizen $\boldsymbol{R}_{wRu}(\tau)$ und $\boldsymbol{R}_{wRy}(\tau)$ berechnet und danach durch Auswertung von (3) die entsprechenden Werte für $G_S(j\omega_l)$ bestimmt. Im Bild 4 sind für drei ausgewählte Frequenzen die erhaltenen Ergebnisse (x) eingezeichnet.

Ein Vergleich der Leistungsfähigkeit dieses Verfahrens mit den bei Anwendung eines Parameterschätzverfahrens erhaltenen Ergebnissen ist in [19] enthalten.

Beispiel 3: Faktorisierung einer vorgegebenen Spektraldichtematrix nach der Verbundprozeßmethode

Gegeben ist die in [17] angegebene Spektraldichtematrix $\boldsymbol{S}_{y_v y_v}(j\omega)$ in parametrischer Form

$$\boldsymbol{S}_{y_v y_v}(j\omega) = \begin{bmatrix} \frac{5+2\omega^2}{4+5\omega^2+\omega^4} & \frac{13+5j\omega+2\omega^2}{30-29j\omega+7\omega^2-5j\omega^3+\omega^4} \\ \frac{13+5j\omega+2\omega^2}{30+29j\omega+7\omega^2+5j\omega^3+\omega^4} & \frac{34+2\omega^2}{225+34\omega^2+\omega^4} \end{bmatrix}.$$

Gesucht ist die Frequenzgangmatrix $\boldsymbol{G}_V(j\omega)$ des Verbundprozesses. Die Auswertung von (4) mit Hilfe des Programmpakets liefert

$$\boldsymbol{G}_V(j\omega) = \frac{1}{13\sqrt{5}} \begin{bmatrix} \frac{65+41j\omega}{2+3j\omega-\omega^2} & \frac{-3j\omega}{2+3j\omega-\omega^2} \\ \frac{169+41j\omega}{15+8j\omega-\omega^2} & \frac{13-3j\omega}{15+8j\omega-\omega^2} \end{bmatrix}.$$

Ein entsprechender Ergebnisausdruck hierfür ist im Bild 7 enthalten. Bei diesem Faktorisierungsalgorithmus treten immer gleiche Nennerpolynome in den Elementen einer Zeile auf.

Zusammenfassung

Im Beitrag wurde ein Programmpaket zur Identifikation von Mehrgrößenregelkreisen, das nichtparametrische Frequenzgangmodelle für die unbekannte Mehrgrößenregelstrecke ermittelt, vorgestellt. Es enthält neben dem Steuerprogramm und Hilfsprogrammen für die Datenverwaltung Programme zur Bestimmung der Frequenzgangmatrix $\boldsymbol{G}_S(j\omega)$ nach der

- Indirekten Methode
- Direkten Methode
- Korrelationsmethode
- Verbundprozeßmethode.

Das Programmpaket ist in der Programmiersprache PASCAL-2 geschrieben und auf den Kleinrechnern K 1630 sowie SM 4-20 implementiert. Es ist für die Identifikation technischer und nichttechnischer Mehrgrößenregelstrecken sowie für die Ausbildung von Ingenieuren auf diesem Fachgebiet geeignet.

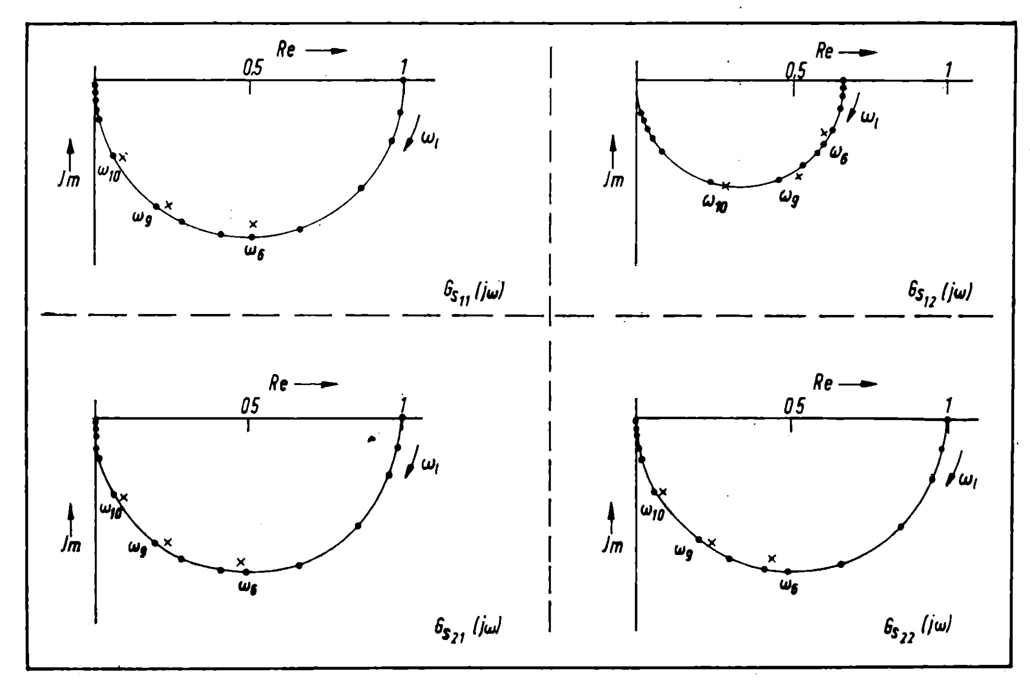


Bild 4. Frequenzgangmatrix $G_S(j\omega_l)$ der Regelstrecke
· Beispiel 1; × Beispiel 2 (ausgewählte Frequenzen)

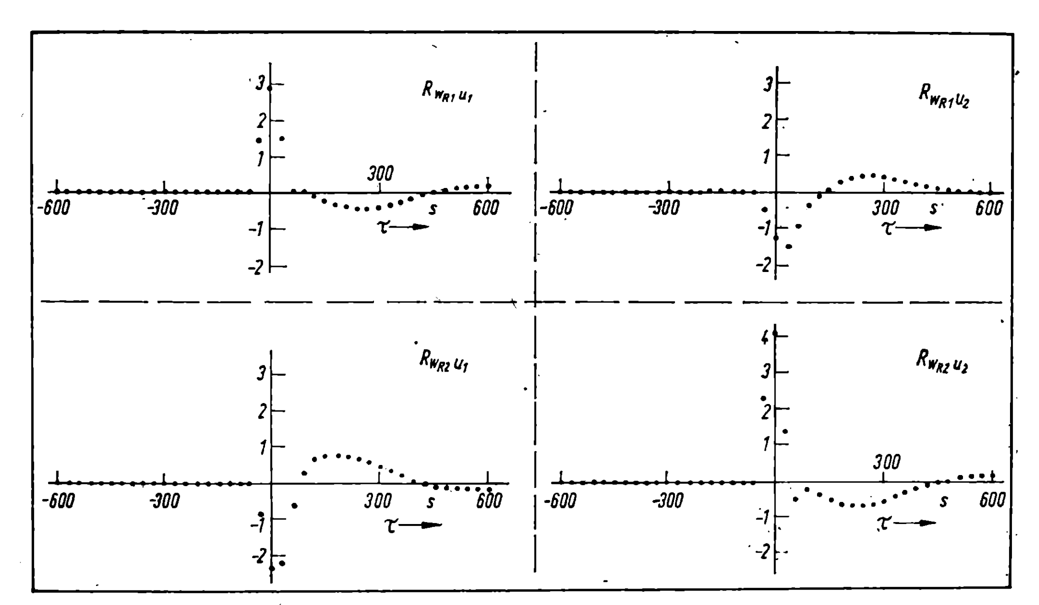


Bild 5. Kreuzkorrelationsmatrix $R_{W_R u}(\tau)$

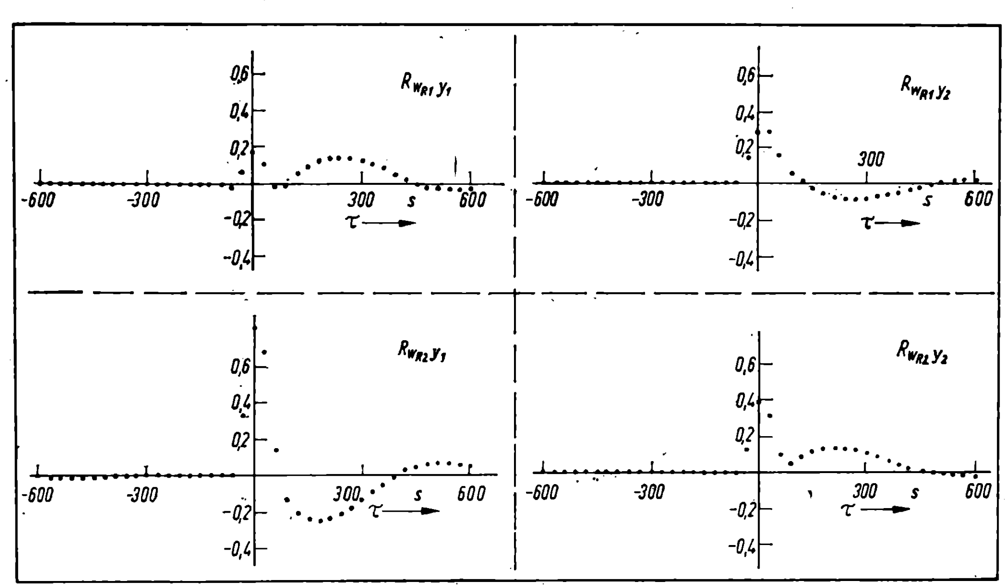


Bild 6. Kreuzkorrelationsmatrix $R_{W_R y}(\tau)$

\>>> Programmsystem V E R B U N D <<<

Programm : VERBMAT

Name des Files :G.TXT

ZEILE	SPALT	POLYNOM	ORD	KOEFFIZIENT/POL NR.	WERT
1	1	Zaehler	1	0	2.2360680
				1	1.4104429
		Nenner	2	1Re	-2.0000000
				Im	0.0000000
				V	1
				2Re	-1.0000000
				Im	0.0000000
				V	1
1	2	Zaehler	1	0	0.0000000
				1	-0.1032031
		Nenner	2	1Re	-2.0000000
				Im	0.0000000
				V	1
				2Re	-1.0000000
				Im	0.0000000
				V	1
2	1	Zaehler	1	0	5.8137767
				1	1.4104429
		Nenner	2	1Re	-5.0000000
				Im	0.0000000
				V	1
				2Re	-3.0000000
				Im	0.0000000
				V	1
2	2	Zaehler	1	0	0.4472136
				1	-0.1032031
		Nenner	2	1Re	-5.0000000
				Im	0.0000000
				V	1
				2Re	-3.0000000
				Im	0.0000000
				V	1

Bild 7. Ergebnisausdruck für $G_V(j\omega)$

Literatur

[1] *Gustavsson, I.; Ljung, L.; Söderström, T.:* Identification of processes in closed loop — Identifiability and accuracy aspects. Automatica 13 (1977) 1, pp. 59—75.

[2] *Bretthauer, G.:* Identifikation rückgekoppelter Mehrgrößensysteme im Frequenzbereich — Einheitliche Darstellung und Vergleich der Verfahren. Dissertation B, TU Dresden 1983.

[3] *Lobbia, R. N.; Saridis, G.:* On-line identification and control of multivariable stochastic feedback systems. Journal of Cybernetics (1973) 1, pp. 40—59.

[4] *Phadke, M. S.:* Multiple time series modelling and system identification with applications. Ph. D. thesis, M. E. Dept., University Wisconsin, Madison 1973.

[5] *Ljung, L.; Gustavsson, I.; Söderström, T.:* Identification of linear multivariable systems operating under linear feedback control. IEEE Trans. AC-19 (1974) 6, pp. 836—840.

[6] *Wilfert, H.-H.; Gamaleja, T.:* Application of the method of correlation and mean square estimation in identification of multivariable closed loop systems. Preprints, 5th IFAC Symposium on Identification and System Parameter Estimation. Darmstadt 1979, Vol. 1, pp. 627—636.

[7] *Schwalm, D.:* Identification of multiple-input multiple-output linear systems by correlation methods. Int. Journal of Control, 13 (1971) 6, pp. 1131 to 1135.

[8] *Bretthauer, G.; Wilfert, H.-H.:* Complete system and signal identification of MIMO closed loop systems in the frequency domain. Preprints, 7th IFAC Conference on Digital Computer Applications to Process Control. Wien 1985, pp. 549—554.

[9] *Sin, K. S.; Goodwin, G. C.:* Identifiability conditions for continuous time linear closed loop systems. Preprints 5th IFAC Symposium on Identification and System Parameter Estimation, Darmstadt 1979. Vol. 1, pp. 653 to 659.

[10] *Wilfert, H.-H.:* Signal- und Frequenzganganalyse an stark gestörten Systemen. Berlin: VEB Verlag Technik 1969.

[11] *Strobel, H.:* Experimentelle Systemanalyse. Berlin: Akademie-Verlag 1975.

[12] *MacFarlane, A. G. J.:* A survey of some recent results in linear multivariable feedback theory. Automatica 8 (1972) pp. 455—492.

[13] *Korn, U.; Wilfert, H.-H.:* Mehrgrößenregelungen. Moderne Entwurfsprinzipien im Zeit- und Frequenzbereich. Berlin: VEB Verlag Technik 1982.

[14] *Badelt, W.; Range, T.; Richter, J.:* Programmpaket zur Meßwerterfassung und Signalanalyse auf der Basis des Mikrorechnersystems K 1600 mit PEA Subsystemen. Vorabdruck 5. Arbeitstagung „Algorithmisierte Prozeßanalyse", Dresden 1984, S. 85—89.

(Fortsetzung auf Seite 353)

W. Drewelow; M. Halwaß

Experimentelle Ermittlung linearer Modelle zur Beschreibung der gesteuerten Schiffsbewegung

0. Einleitung

Eine Reihe unterschiedlicher Aufgaben auf dem Gebiet der Manövrierbarkeit von Schiffen erfordert die Arbeit mit mathematischen Modellen des Steuerverhaltens. So interessiert sich beispielsweise der Hydrodynamiker für den Einfluß des Tiefgangs, des Trimmwinkels und der Wassertiefe auf die Manövriereigenschaften von Schiffen. Ebenso ist für ihn eine schnelle Bestimmung der Abhängigkeit des Manöververhaltens von der jeweiligen Schiffsform und eine Untersuchung der Übertragbarkeit von Versuchen mit Schiffsmodellen auf die Großausführung, d. h. die Prognose von Manövereigenschaften, von Bedeutung. Der Nautiker wird sich vorrangig für Probleme der Bahnvorhersage, der Manöverempfehlung und der Kollisionsverhütung interessieren. Im engen Zusammenhang damit steht das Anliegen, geeignete Algorithmen zur Regelung des Kursverhaltens oder zur Positionsregelung zu entwerfen, die z. B. Forderungen nach geringen Kursabweichungen oder großer Positioniergenauigkeit bei begrenztem Einsatz von Stellenergie realisieren.

Gemeinsam ist allen genannten Problemen, daß für ihre Bearbeitung entsprechende mathematische Modelle des jeweiligen Schiffstyps ermittelt werden müssen. Die Vielfalt der zu lösenden Aufgaben bedingt völlig natürlich auch eine ganze Hierarchie von Modellen. Mit der theoretischen Prozeßanalyse, die eine tiefe Kenntnis der hydrodynamischen Gesetzmäßigkeiten erfordert, kann eine weitgehend vollständige Modellierung des Manöververhaltens erfolgen. Das entstehende Gleichungssystem ist sehr umfangreich. Den einzelnen Elementen des mathematischen Modells kann eine physikalische Interpretation zugeordnet werden. Allerdings erfordert die vollständige Parametrisierung des Gleichungssystems einen großen meßtechnischen Aufwand.

Demgegenüber ist beispielsweise für den Entwurf eines Kursreglers ein einfacheres Modell sinnvoll, bei dem die physikalische Interpretierbarkeit von Modellparametern eine untergeordnete Rolle spielt. Wichtiger ist hier beispielsweise die Existenz einer geeigneten Entwurfsstrategie für die betrachtete Modellklasse. Die Auswertung von Meßdaten durch die bekannten Systemidentifikationsverfahren dient vorzugsweise der Ermittlung linearer Black-box-Modelle, die auf einer niedrigen Ebene der Modellhierarchie stehen. Diese Modelle sind üblicherweise der Ausgangspunkt von Entwurfsstrategien für Autopiloten [3] und [5]. Andererseits gestatten die Parameter dieser einfachen Modelle Rückrechnungen auf die komplexeren Modellansätze. So lassen sie sich beispielsweise für Rückrechnungen auf die Kräfte- und Momentenanstiege in den vollständigen Bewegungsgleichungen benutzen [3]. Veränderungen der Kräfte- und Momentenbilanzen durch Variation von Beladungszustand, Trimmwinkel oder Wassertiefe sind damit vergleichsweise schnell modellierbar. Die Identifikation von einfachen Black-box-Modellen hat somit für die unterschiedlichen Forschungsgegenstände im Bereich der Manövrierbarkeit von Schiffen eine besondere Wertigkeit. Im Beitrag wird eine geeignete Vorgehensweise zur Ermittlung linearer Modelle für das Steuerverhalten von Schiffen mit Hilfe von Identifikationsverfahren beschrieben. Der erste Abschnitt befaßt sich mit Modellen des Steuerverhaltens. Der Gegenstand des zweiten Abschnitts ist eine Übersicht über die verwendeten Identifikationsmethoden. Die Gestaltung der experimentellen Bedingungen bei den durchgeführten Untersuchungen wird im dritten Abschnitt beschrieben. Ausgewählte Ergebnisse von Identifikationsuntersuchungen enthält der vierte Abschnitt.

Dr.-Ing. *Wolfgang Drewelow* (33) studierte von 1972 bis 1976 Technische Kybernetik und Automatisierungstechnik an der Sektion Technische Elektronik der Wilhelm-Pieck-Universität Rostock. Seit 1976 im dortigen WB Automatische Steuerungen wissenschaftlicher Assistent. 1984 Promotion A.

Dipl.-Ing. *Martin Halwaß* (28) studierte von 1978 bis 1983 Automatisierungstechnik an der Sektion Technische Elektronik der Wilhelm-Pieck-Universität Rostock. Seit 1983 am dortigen WB Automatische Steuerungen Forschungsstudent.

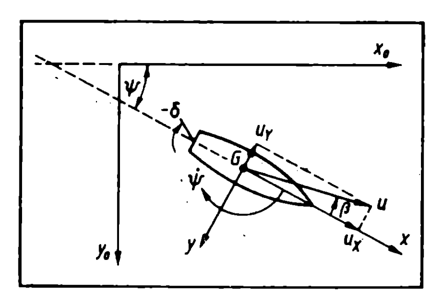


Bild 1. Benutzte Variablen zur Beschreibung der Bewegung in der horizontalen Ebene

x_0, y_0 raumfestes Koordinatensystem; x, y schiffsfestes Koordinatensystem; ψ Kurswinkel; $\dot\psi$ Kurswinkelgeschwindigkeit; β Gierwinkel; δ Ruderwinkel; G Schiffsschwerpunkt; u augenblicklicher Geschwindigkeitsvektor; u_X Geschwindigkeit in Vorwärtsrichtung; u_Y Geschwindigkeit in seitlicher Richtung; X, Y Kräfte in x- bzw. y-Richtung; M Moment bezüglich der z-Achse; m Schiffsmasse; J_{zz} Trägheitsmoment bezüglich der z-Achse

1. Modellansätze

Um auf dem Wege der theoretischen Prozeßidentifikation zu handhabbaren Bewegungsgleichungen für gesteuerte Schiffsbewegungen zu kommen, müssen einschneidende Voraussetzungen getroffen werden. Bei schiffsfestem Koordinatensystem gilt bei Beschränkung auf die horizontale Bewegung eines symmetrischen Schiffes (starrer Körper) im tiefen, unbegrenzten Wasser das normierte Gleichungssystem (1) nach [9]:

$$m(\dot u_X - u_Y\dot\psi) = X\,, \tag{1a}$$

$$m(\dot u_Y + u_X\dot\psi) = Y\,, \tag{1b}$$

$$J_{ZZ}\ddot\psi = M. \tag{1c}$$

Die in (1) auftretenden Größen sowie weitere nachfolgend benutzte Größen zur Beschreibung des Bewegungsverhaltens sind im Bild 1 erklärt. Die Kräfte X und Y sowie das Moment M sind komplizierte Funktionen der Schiffsbewegung. Eine Lösung dieses Gleichungssystems ist nur numerisch möglich. Für Bewegungen in der Nähe der geraden Bahn erhält man bei vollständiger Linearisierung um den stationären Punkt

$$u_Y = \dot\psi = \delta = 0$$

die beiden entkoppelten Differentialgleichungen 2. Ordnung, die den vereinfachten Zusammenhang zwischen dem Ruderwinkel δ und dem Kurswinkel ψ bzw. dem Gierwinkel β herstellen:

$$\dddot\psi T_1T_2 + \ddot\psi(T_1 + T_2) + \dot\psi = k_1(\dot\delta T_3 + \delta)\,, \tag{2a}$$

$$\ddot\beta T_1T_2 + \dot\beta(T_1 + T_2) + \beta = k_2(\dot\delta T_{3v} + \delta)\,. \tag{2b}$$

Üblich sind Darstellungen des Gleichungssystems (2) im Zustandsraum (z. B. [5]) oder durch die entsprechenden Übertra-

(Fortsetzung von Seite 352)

[15] *Fischer, J.*: Interaktives Programmpaket zur Analyse mehrdimensionaler Zeitreihen mit SM4 oder K 1630. msr, Berlin 30 (1987) 9, S. 409–411.
[16] *Rödder, P.*: Systemidentifikation mit stochastischen Signalen im geschlossenen Regelkreis — Verfahren und Fehlerabschätzung. Dissertation, TH Aachen 1973.
[17] *Schwarz, H.*: Mehrfachregelungen. Band 1. Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag 1967.
[18] *Jensen, K.; Wirth, N.*: Pascal User Manual and Report. Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag 1985.
[19] *Bretthauer, G.; Gamaleja, T.; Wilfert, H.-H.*: Identification of parametric and nonparametric models for MIMO closed loop systems by the correlation method. Preprints 9th IFAC World Congress. Budapest 1984, Vol. X, pp. 139–144. msr 8691

gungsfunktionen (3) im p-Bereich:

$$\frac{\dot{\psi}(p)}{\delta(p)} = \frac{k_1(1 + pT_3)}{(1 + pT_1)(1 + pT_2)}, \tag{3a}$$

$$\frac{\psi(p)}{\delta(p)} = \frac{k_1(1 + pT_3)}{p(1 + pT_1)(1 + pT_2)}, \tag{3b}$$

$$\frac{\beta(p)}{\delta(p)} = \frac{k_2(1 + pT_{3v})}{(1 + pT_1)(1 + pT_2)}. \tag{3c}$$

Liegen die beiden Pole $-1/T_1$ und $-1/T_2$ der Übertragungsfunktionen in der linken p-Halbebene, ist das untersuchte Schiff gierstabil. Dabei ist die Nebenbedingung gesetzt, daß nur reelle Pole physikalisch interpretierbar sind. Zwischen den Koeffizienten in (2) bzw. (3) und den Ableitungen der hydrodynamischen Kräfte und Momente besteht ein Zusammenhang, der nach Ermittlung schiffsspezifischer Trägheitskoeffizienten auflösbar ist [3]. Dieser Zusammenhang begründet das Interesse des Hydrodynamikers an den linearen Modellen.

Eine weitere Vereinfachung der Übertragungsfunktion (3b) wurde in [8] mit

$$\frac{\psi(p)}{\delta(p)} = \frac{k_1}{p(1 + pT)}; \qquad T = T_1 + T_2 - T_3 \tag{4}$$

vorgeschlagen.

Der Gültigkeitsbereich der angeführten linearen Modelle ist auf geringe Abweichungen vom stationären Punkt, d. h. auf Bewegungen in der Nähe der geraden Bahn begrenzt. So besagen Erfahrungen, daß für eine große Anzahl von Schiffstypen bei einem 10°/10°-Zick-Zack-Testmanöver lineare Modelle noch mit guter Näherung angenommen werden dürfen, während ein 20°/20°-Zick-Zack-Testmanöver schon wesentlich durch nichtlineare Effekte bestimmt werden kann [5]. Da das nichtlineare Modell (1) sehr komplex ist, wurden einfachere nichtlineare Modelle entwickelt. Eine Übersicht ist z. B. in [3] enthalten. Üblich ist die Einführung variabler, arbeitspunktabhängiger Koeffizienten in die Modellgleichungen (3a) oder (4).

Im Beitrag soll eine Beschränkung auf lineare Systeme erfolgen. Erprobungen einfacher nichtlinearer Ansätze sind Gegenstand weiterer Untersuchungen.

Die Bestimmung eines Prozeßmodells auf dem Weg der Identifikation erfolgt i. allg. auf der Grundlage zeitdiskreter, äquidistanter Meßdaten. Aus diesen Daten können unmittelbar kontinuierliche Modelle gewonnen werden (z. B. [5]), üblicher ist aber wegen der Begrenzung des Rechenaufwands der Weg über zeitdiskrete Modelle. Unter der Annahme eines Haltegliedes 0. Ordnung am Prozeßeingang ergibt sich die den kontinuierlichen Modellen (2) bis (4) entsprechende zeitdiskrete Beschreibung durch die Differenzengleichung (5) in Polynomschreibweise:

$$\left.\begin{aligned} A(q^{-1})\, y(k) &= B(q^{-1})\, u(k)\,, \\ A(q^{-1}) &= 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_n q^{-n}\,, \\ B(q^{-1}) &= b_1 q^{-1} + \dots + b_n q^{-n}\,. \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

Hierin ist q^{-1} der Zeitverschiebeoperator mit der Eigenschaft $q^{-1}x(k) = x(k-1)$. Die Eingangs- bzw. Ausgangsgröße zum Zeitpunkt kT (T bezeichnet die Abtastperiode) wird der gebräuchlichen Notierung folgend als $u(k)$ bzw. $y(k)$ bezeichnet. Im konkreten Beispiel sollen als Eingangsgrößen der Soll-Ruderwinkel δ_S oder der Ist-Ruderwinkel δ_I, als Ausgangsgrößen der Kurswinkel ψ, die Kurswinkelgeschwindigkeit $\dot{\psi}$ oder der Gierwinkel β stehen. Bei der Transformation der kontinuierlichen Modelle in zeitdiskrete Modelle bleibt die Modellordnung erhalten, d. h., die Transformation der Modelle (3a), (3c) und (4) führt auf die Ordnung $n = 2$, die des Modells (3b) auf $n = 3$. Bei der Benutzung des Kurswinkels als Modellausgangssignal (Modelle (3b) und (4)) enthält das Polynom $A(q^{-1})$ wegen der integralen Eigenschaft des Systems den Faktor $(1 - q^{-1})$. Eine Rückrechnung von einer gegebenen Differenzengleichung in den p-Bereich ist eindeutig möglich, wenn das Polynom $A(q^{-1})$ keinen negativ reellen Einzelpol enthält.

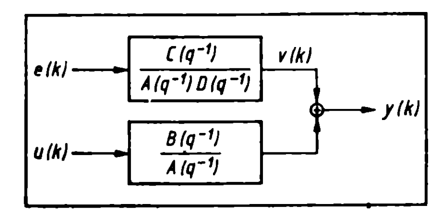


Bild 2. Struktur des linearen Modells

Bei den bislang angeführten Modellen wurden Störungen vernachlässigt. Praktisch wird das Verhalten eines Schiffes jedoch durch Wind, Wellen und Strömung beeinflußt. Eine gute Übersicht über Störmodelle und ihre Berücksichtigung in den Bewegungsgleichungen vom Typ (1) ist in [5] gegeben. Bei der experimentellen Modellbildung werden die Steuergrößen für die Störungen des Bewegungsverhaltens (z. B. Strömungsgeschwindigkeit und -winkel) i. allg. nicht direkt gemessen. Deshalb wird auch hier der in der linearen Regelungstheorie übliche Ansatz einer additiv überlagerten Ausgangsstörung, die über eine rationale Störübertragungsfunktion aus weißem Rauschen erzeugt wurde, benutzt. Ein weitgehend allgemeiner Ansatz für die Störübertragung ist durch

$$\left.\begin{aligned} v(k) &= \frac{C(q^{-1})}{A(q^{-1})\, D(q^{-1})}\, e(k)\,, \\ C(q^{-1}) &= 1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_n q^{-n}\,, \\ D(q^{-1}) &= 1 + d_1 q^{-1} + \dots + d_n q^{-n} \end{aligned}\right\} \tag{6}$$

gegeben. Hierin ist $v(k)$ das dem Ausgangssignal additiv überlagerte Störsignal und $e(k)$ zeitdiskretes weißes Rauschen mit der Varianz $E[e^2(k)] = \sigma^2$. Das Gesamtmodellsystem, das durch die Systemgleichung

$$A(q^{-1})\, y(k) = B(q^{-1})\, u(k) + \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})}\, e(k) \tag{7}$$

beschrieben werden kann, ist im Bild 2 dargestellt. Als Spezialfälle von (7) ergeben sich das Least-Squares-Modell mit $D(q^{-1}) = 1$ und $C(q^{-1}) = 1$, das ARMAX-Modell nach *Åström* mit $D(q^{-1}) = 1$ bzw. das von *Box* und *Jenkins* [6] verwandte Modell mit $A(q^{-1}) = 1$. Bei der Wahl des Störmodells ist wiederum eine Reihe sich widersprechender Forderungen zu berücksichtigen: Genauigkeit der spektralen Widerspiegelung der Störung zur Vermeidung von Schätzfehlern, das Prinzip der Sparsamkeit bei der Anzahl der anzusetzenden Parametern und der Zweck der weiteren Verwendung (z. B. Verfügbarkeit entsprechender Entwurfsverfahren für die Modellgruppe). Den hier beschriebenen Auswertungen wurde das ARMAX-Modell

$$A(q^{-1})\, y(k) = B(q^{-1})\, u(k) + C(q^{-1})\, e(k) \tag{8}$$

zugrunde gelegt.

2. Identifikationsverfahren

Identifikationsmethoden werden in vielen Büchern und Artikeln abgehandelt. Mit der Wahl des oben angegebenen ARMAX-Modells reduziert sich die Anzahl der für die Parameterschätzung in Betracht zu ziehenden Verfahren im wesentlichen auf die Vorhersagefehlermethoden und die Instrumentalvariablenmethoden. Gute Übersichten dafür sind in [2] und [10] gegeben.

Bei den vorliegenden Untersuchungen bestand keine Notwendigkeit, sofort nach jedem Abtastschritt einen neuen Parametersatz zu ermitteln. Daher war auch keine Beschränkung auf die Klasse der rekursiven Verfahren notwendig, die gegenüber den Off-line-Verfahren i. allg. einen größeren Informationsverlust der Meßdaten bewirken.

Im folgenden sollen die benutzten Verfahren kurz vorgestellt werden.

2.1. *Maximum-Likelihood-Schätzung*

Die Maximum-Likelihood-Schätzung nach [1] ist eine spezielle Realisierung der Vorhersagefehlermethoden für die Modellform (8). Als Vorhersagefehler dient die Differenz

$$\varepsilon(k) = y(k) - \hat{y}(k \mid k-1)\,. \tag{9}$$

Hierin bezeichnet $\hat{y}(k \mid k-1)$ die (bezüglich der Meßwerte) lineare Least-Squares-Vorhersage von $y(k)$ auf der Grundlage der Daten bis zum Zeitpunkt $k - 1$. Sie ergibt sich unter Vernachlässigung von Anfangswerteffekten zu

$$\hat{y}(k \mid k-1) = \frac{C(q^{-1}) - A(q^{-1})}{C(q^{-1})}\, y(k) + \frac{B(q^{-1})}{C(q^{-1})}\, u(k)\,. \tag{10}$$

Als skalares Gütemaß wird in [9]

$$V(\boldsymbol{\Theta}) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{N} \varepsilon^2(k) \tag{11}$$

eingeführt, wobei

$$\boldsymbol{\Theta} = (a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_n, c_1, \dots, c_n)^T$$

und N die Anzahl der Meßwerte sind. Die Minimierung von (11) führt auf die gleiche Lösung wie die Minimierung der negativen Likelihood-Funktion unter der Annahme der Normalverteilung der Residuen $\varepsilon(k)$:

$$-\log L = \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{k=1}^{N} \varepsilon^2(k) + N \log \sigma + \frac{N}{2} \log 2\pi\,. \tag{12}$$

Wenn $\hat{\boldsymbol{\Theta}}$ so gefunden wurde, daß $V(\hat{\boldsymbol{\Theta}})$ minimal ist, kann die Varianz des zeitdiskreten weißen Rauschens geschätzt werden:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{2}{N} V(\hat{\boldsymbol{\Theta}})\,. \tag{13}$$

Wegen des nichtlinearen Zusammenhangs des Vorhersagefehlers mit den Parametern des $C(q^{-1})$-Polynoms kann dieses Extremwertproblem nicht explizit gelöst werden. Die Minimierung wird bei dem hier benutzten Algorithmus wahlweise durch das Gauß-Newton-Verfahren oder das Newton-Raphson-Verfahren realisiert. Schätzwerte für die Parametervarianz erhält man über die Diagonalelemente der Hesseschen Matrix im letzten Iterationsschritt. Als Startwerte für die Iteration werden üblicherweise die Prozeßparameter aus der Least-Squares-Schätzung und die Wahl $C(q^{-1}) = 1$ empfohlen. In [1] ist bewiesen, daß unter der Bedingung normalverteilter Störungen die Parameterschätzung, die zur Minimierung des Gütefunktionals führt, konsistent, asymptotisch normalverteilt und asymptotisch effizient ist. Allgemeinere Aussagen über den praktisch realistischen Fall, daß das wahre System nicht innerhalb der gewählten Modellklasse liegen muß, sind in [6] getroffen.

Da mit dem beschriebenen Verfahren neben den Parametern und Varianzwerten auch die Likelihood-Funktion mitgeschätzt werden kann, läßt sich zudem sehr einfach das Verfahren zum Ordnungstest nach *Akaike* anwenden, das den Gesichtspunkt der Sparsamkeit bei der Wahl der Modellkomplexität berücksichtigt. Das Akaike-Kriterium besagt, daß das Minimum der Verlustfunktion

$$AIC = -\log L + 2q \tag{14}$$

zu wählen ist, wobei q die Anzahl der Modellparameter angibt.

2.2. *Verfahren von Mayne und Firoozan*

Ein Problem bei dem im Abschn. 2.1. beschriebenen Verfahren besteht darin, daß die negative Likelihood-Funktion neben dem gesuchten globalen Minimum noch mehrere Nebenminima haben kann. Da die genannten, gebräuchlichen Optimierungsverfahren auf der Basis der Auswertung des Gradienten nur lokale Extremwerte liefern, ist der Konvergenzpunkt dann stark von den Startwerten des Verfahrens abhängig. Eine mögliche lineare Prozedur mit dementsprechend nur einem (globalen) Konvergenzpunkt wurde in [7] angegeben. Dieses Verfahren arbeitet in 3 Stufen (jeweils als Vorhersagefehler-Least-Squares-Verfahren). Ohne auf Details einzugehen, sei hier die Grundidee erläutert. In der ersten Stufe werden die zu analysierenden Daten einer normalen Least-Squares-Schätzung für die Modellordnung p unterworfen. Das entstehende Prozeßmodell hat die Übertragungsfunktion $\hat{B}_1(q^{-1})/\hat{A}_1(q^{-1})$, das implizit verwendete Störmodell hat die Form $1/\hat{A}_1(q^{-1})$. Damit wird der tatsächlich vorliegende ARMA Störprozeß durch einen AR-Prozeß der Ordnung p approximiert. Diese Approximation ist um so besser, je größer p gewählt wird, sie ist exakt für unendliche Ordnung. Der geschätzte AR-Prozeß hoher Ordnung wird dazu benutzt, den Verlauf des Störfiltereingangssignals $e(k)$ in (von p abhängiger) Näherung zu ermitteln. Aus Eingangs-, Ausgangs- und geschätztem Residuenverlauf werden im zweiten Schritt über den einfachen Least-Squares-Ansatz die Schätzungen $\hat{A}_2(q^{-1})$, $\hat{B}_2(q^{-1})$ und $\hat{C}_2(q^{-1})$ ermittelt, wobei diese Polynome die angesetzte Modellordnung n haben. Dieser Ansatz würde für den Fall einer mit der Meßwertanzahl wachsenden Modellordnung p im ersten Schritt bereits zu konsistenten Schätzwerten führen (p-Konsistenz). Da im praktischen Fall immer mit endlicher Ordnung gerechnet wird, wirkt sich der entstandene Bias bei Schätzung der Residuen auch auf die Schätzung der Polynome $\hat{A}_2(q^{-1})$, $\hat{B}_2(q^{-1})$ und $\hat{C}_2(q^{-1})$ aus. Dieser Fehler wird im dritten Schritt durch eine Filterung der Meßdaten und der Residuen über das Formfilter $1/\hat{C}_2(q^{-1})$ und die Anwendung der Least-Squares-Schätzung auf die gefilterten Verläufe zur Ermittlung der Schätzwerte $\hat{A}_3(q^{-1})$, $\hat{B}_3(q^{-1})$ und $\hat{C}_3(q^{-1})$ reduziert. Für diese im letzten Schritt ermittelten Parameter wird in [7] sowohl p-Konsistenz als auch p-Effizienz (die asymptotische Varianz der Schätzung konvergiert mit Wahrscheinlichkeit Eins gegen die durch die Rao-Cramer-Ungleichung vorgegebenen minimale asymptotische Varianz für $p \to \infty$) nachgewiesen.

Die rechentechnische Umsetzung des Verfahrens ist unkompliziert, da der Algorithmus im wesentlichen nur die Least-Squares-Schätzungen in den unterschiedlichen Stufen und eine Datenfilterung zu realisieren hat.

2.3. *Instrumentalvariablenverfahren und MA-Prozeß-Schätzung*

Das Instrumentalvariablenverfahren (Hilfsvariablenverfahren) benötigt im Gegensatz zu den beiden vorhergehend angeführten Verfahren keine explizite Beschreibung der Rauschdynamik und ermittelt damit i. allg. eine geringere Parameteranzahl. Die allgemeine Schätzvorschrift für den durch das Eingangssignal gesteuerten Modellanteil von (8) lautet

$$\left.\begin{aligned} \hat{\boldsymbol{\Theta}} &= [\sum_{k=1}^{N} \boldsymbol{z}(k)\, \boldsymbol{\varphi}(k)^T]^{-1} \sum_{k=1}^{N} \boldsymbol{z}(k)\, y(k)\,, \\ \hat{\boldsymbol{\Theta}} &= (\hat{a}_1, \dots, \hat{a}_n, \hat{b}_1, \dots, \hat{b}_n)^T\,, \\ \boldsymbol{\varphi} &= (-y(k-1), \dots, -y(k-n), u(k-1), \dots, u(k-n))^T\,. \end{aligned}\right\} \tag{15}$$

Diese Schätzung unterscheidet sich von der Grundform der Parameterschätzung — der Least-Squares-Schätzung — nur durch die formale Ersetzung des Meßwertvektors $\boldsymbol{\varphi}(k)$ durch den Hilfsvariablenvektor $\boldsymbol{z}(k)$. Dieser Vektor $\boldsymbol{z}(k)$ enthält die Hilfsvariablen, die über ein entsprechendes Hilfsmodell ermittelt werden müssen. Im Gegensatz zur Least-Squares-Schätzung liefert jedoch das Instrumentalvariablenverfahren asymptotisch Parameterwerte ohne systematischen Schätzfehler, wenn die Konsistenzbedingungen

$$\left.\begin{aligned} E[(\boldsymbol{z}(k)\, \boldsymbol{\varphi}(k)^T] &= \boldsymbol{R} \quad \text{regulär} \\ E[\boldsymbol{z}(k)\, v(k)] &= \boldsymbol{0} \end{aligned}\right\} \tag{16}$$

erfüllt sind. Damit hängen sowohl Konsistenz als auch Effizienz des Verfahrens sehr stark vom gewählten Hilfsmodell ab. Für die Gestaltung des Hilfsmodells wurde deshalb folgerichtig eine Vielzahl von Ansätzen vorgeschlagen, denen zumeist heuristische Überlegungen zugrunde liegen.

Da die Anwendung des Verfahrens im offenen Kreis erfolgen soll, sind im Vektor $\boldsymbol{z}(k)$ nur Hilfsvariablenwerte für das Ausgangssignal zu ermitteln [10]. Ein neuer Hilfsvariablenwert des Ausgangssignals wird hier als das Skalarprodukt aus aktuellem Meßvektor $\boldsymbol{\varphi}(k)$ und dem Hilfsmodellparametervektor bestimmt. Dabei wurde das Hilfsvariablenverfahren in iterativer Form verwendet, wobei die Parameterschätzwerte des letzten Iterationsschritts als zeitinvariantes Hilfsmodell für die neue Iteration benutzt werden. Zum Start der Iteration dient als Hilfsmodell der Parametervektor der Least-Squares-Schätzung. Der Abbruch der Iterationen erfolgt, wenn keine signifikante Änderung der Schätzparameter bzw. des Hilfsmodells mehr erfolgt.

Dieses Verfahren schätzt die Parameter des $C(q^{-1})$-Polynoms im Modell (8) nicht mit. Um diese zu erhalten, muß ein zweiter Schätzschritt angeschlossen werden. Mit Kenntnis der geschätzten Parameter des $A(q^{-1})$-Polynoms läßt sich der Fehlerprozeß

$$w(k) = A(q^{-1})\, y(k) - B(q^{-1})\, u(k) \tag{17}$$

als MA-Prozeß darstellen, dessen Parameter im Fall richtig geschätzter Streckenparameter mit den Koeffizienten des $C(q^{-1})$-Polynoms übereinstimmen. Verfahren zur Schätzung von MA-Parametern sind z. B. in [4] angegeben. Für die vorliegenden Untersuchungen wurde diese Schätzung mit einem entsprechenden Maximum-Likelihood-Verfahren vorgenommen.

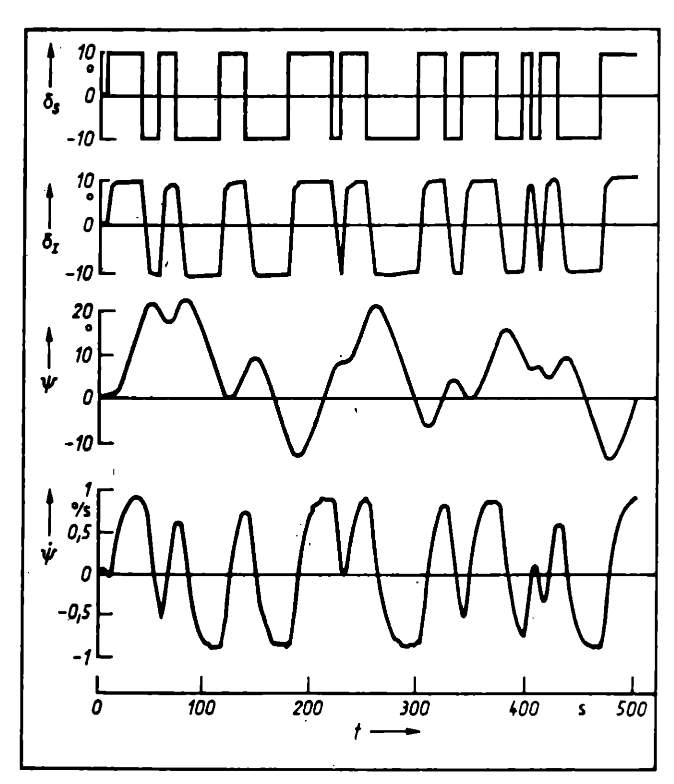


Bild 3. Typische Meßsignalverläufe

Soll eine Messung des Kurswinkels zur Ermittlung eines parametrischen Modells der Form (8) benutzt werden, beinhaltet die Zerlegung des Polynoms $A(q^{-1})$ in der Form

$$\left.\begin{aligned} A(q^{-1}) &= (1 - q^{-1})\, A'(q^{-1})\,, \\ A'(q^{-1}) &= 1 + a_1' q^{-1} + \ldots + a_{n-1} q^{-n+1}\,, \end{aligned}\right\} \tag{18}$$

die Möglichkeit einer Berücksichtigung dieser A-priori-Information bereits im Schätzansatz. Praktisch müßten dazu offensichtlich die unveränderten Werte des Eingangssignals und die Differenzen des Ausgangssignals dem Schätzalgorithmus zugeführt werden. Dies führt speziell auch zu einer Reduzierung des Rechenaufwands (Verringerung der Ordnung). Mit diesem Ansatz wird gleichzeitig der Integratoranteil im Nenner der Störübertragungsfunktion $C(q^{-1})/A(q^{-1})$ festgelegt. Damit ist der Störprozeß selbst als ARIMA-Prozeß, d. h. als Prozeß mit instationärem Anteil, angesetzt. Umgangen werden könnte dieser Ansatz nur bei Anwendung des oben angegebenen Instrumentalvariablenverfahrens, wobei in der zweiten Stufe zur Bildung der Störprozeßschätzung wieder nicht die Ausgangsdifferenzen, sondern die Originaldaten verwendet werden müssen.
Bei den hier vorgestellten Auswertungen wurde ein solcher A-priori-Ansatz über den integralen Charakter der Strecke nicht angenommen.

3. Experimentelle Bedingungen

Die o. g. Verfahren wurden auf Daten angewandt, die auf einer Forschungsreise des Forschungs- und Ausbildungsschiffs „Klaus Störtebecker" der Ingenieurhochschule für Seefahrt Warnemünde-Wustrow gesammelt wurden. Die vorhandene Meßtechnik bot als Meßgrößen den Kurswinkel ψ, dessen Ableitung $\dot\psi$ (Kurswinkelgeschwindigkeit) und den gegenwärtigen Wert des Ruderwinkels δ_I an. Die Messungen fanden im offenen Kreis statt, d. h., die vorhandene Hand- und Selbststeueranlage wurde für die Zeit der Messungen abgeschaltet. Eine Möglichkeit für die Vorgabe des Sollruderwinkels δ_S war vorhanden.
Die Auflösung des verwendeten A/D- bzw. D/A-Wandlers lag bei 10 bit. Mit den angegebenen Meßgenauigkeiten der Meßaufnehmer ergaben sich für die einzelnen Größen folgende Auflösungsstufen:

$$\Delta\delta_S = 0{,}04°$$
$$\Delta\delta_I = 0{,}04°$$
$$\Delta\psi = 0{,}15°$$
$$\Delta\dot\psi = 0{,}017°/s\,.$$

Während der Reise wurde eine Vielzahl von Messungen unter verschiedenen Bedingungen (Wind, See, Strömung, Testsignal) aufgenommen und ausgewertet. Alle Messungen wurden wegen des vereinfachten Ergebnisvergleichs einheitlich bei einer festen Maschinendrehzahl von 91 min^{-1} (entsprechende Geschwindigkeit 10 kn) durchgeführt. Die durch Manöverbewegungen entstehenden geringfügigen Geschwindigkeitsverluste, die prinzipiell eine Veränderung der Parameter in den Modellen (2) bis (8) hervorrufen, wurden nicht erfaßt und für die nachfolgende Auswertung vernachlässigt. Als Testsignaltypen kamen dabei zwei- und dreiwertige pseudostochastische Testfolgen maximaler Länge, Zick-Zack-Testmanöver (Umschaltung der Ruderrichtung, wenn vorgegebener Sollkurswinkel erreicht wird) und Handsteuersignale mit festen Amplitudenstufen zum Einsatz. Dabei haben die pseudostochastischen Testsignale sicher den Vorteil der exakten Reproduzierbarkeit und der Automatisierbarkeit des Meßablaufs. Sie führten jedoch bei den praktischen Messungen wegen des integralen Charakters der Kursregelstrecke zu großen Kursabweichungen. Günstiger in dieser Hinsicht waren die beiden anderen Signaltypen, wobei jedoch das Zick-Zack-Manöver eine weitgehend monofrequente Anregung des Systems realisiert. Um Unsymmetrien im Steuerverhalten, hervorgerufen durch die einseitige Drehrichtung des Propellers, Wind oder Strömungen zu kompensieren, wurden vor Meßbeginn Stützruderwinkel zwischen 1° und 4° Steuerbord eingestellt.
Im Beitrag wurde nur auf die Auswertung einer ausgewählten Messung (Bild 3) orientiert, bei der das Rudersignal von Hand vorgegeben wurde. Die dabei vorherrschenden Witterungsbedingungen waren sehr günstig — Seegang: 2, Wind: 3,5 m/s. Die Abtastperiode war hier auf 2 s festgelegt, die Anzahl der Meßwerte je Meßgröße betrug 250.

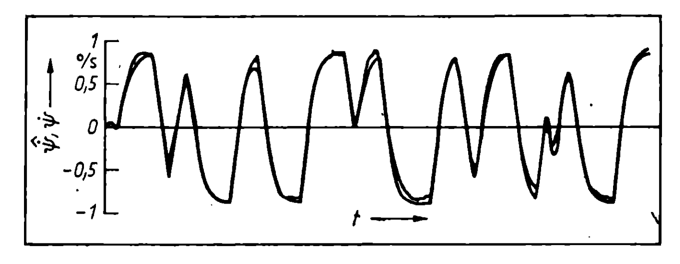
4. Ergebnisse

Die Daten im Bild 3 wurden der Parameterschätzung mit den im Abschn. 2. genannten Verfahren unterworfen. Als Eingangssignal wurde sowohl der Soll-Ruderwinkel δ_S als auch der Ist-Ruderwinkel δ_I benutzt. Dabei ist der Ist-Ruderwinkel die Größe, die den Hydrodynamiker stärker interessiert, da das dynamische Verhalten der Rudermaschine in der Beschreibung nach (1) nicht modelliert wurde. Die erwünschte Rückrechnung auf die hydrodynamischen Derivate ist bei Verwendung des Soll-Ruderwinkels erschwert. Mit den durchgeführten Messungen ist allerdings diese Rückrechnung ohnehin nicht realisierbar, da die Möglichkeit einer meßtechnischen Erfassung des Gierwinkels zur Bildung eines Modells der Form (3c) nicht vorlag. Für den Regelungstechniker ist der Soll-Ruderwinkel als Eingangsgröße von Interesse, da auch die Rudermaschine aus „Sicht" des Reglers zur Strecke gehört. Nachfolgend werden die Ergebnisse, die mit diesem Ansatz errechnet wurden, vorgestellt. Vereinfachend kommt hier die Tatsache zum Tragen, daß die für die Rücktransformation in den p-Bereich getroffenen Voraussetzung eines Halteglieds 0. Ordnung exakt erfüllt ist.

4.1. *Meßgröße: Kurswinkelgeschwindigkeit* $\dot\psi$

Die Auswertung dieser Messung erfolgte mit den Modellordnungen 1 und 2 (entsprechend (4) und (3a)). Dabei wurde festgestellt, daß ein Modell 1. Ordnung zur Beschreibung dieser Bewegungen in der Nähe der geraden Bahn nicht ausreichend ist. Eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenem Bewegungs-

Bild 4. Vergleich von gemessener ($\dot\psi$) und geschätzter ($\hat{\dot\psi}$) Kurswinkelgeschwindigkeit (2. Ordnung)



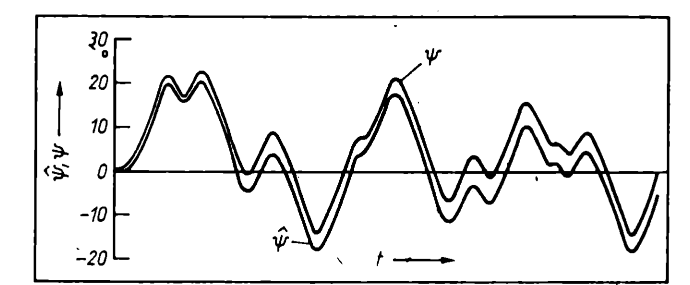


Bild 5. Vergleich von gemessenem (ψ) und geschätztem ($\hat{\psi}$) Kurswinkel (2. Ordnung)

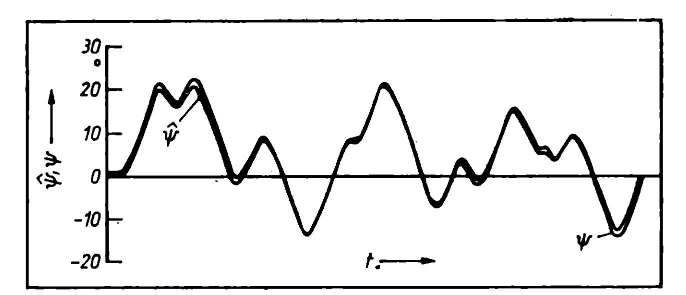


Bild 6. Vergleich von gemessenem (ψ) und geschätztem ($\hat{\psi}$) Kurswinkel (3. Ordnung)

verhalten und dem Verhalten des über die Maximum-Likelihood-Methode ermittelten Modells wurde bei der Modellordnung 2 registriert (Bild 4). Die ermittelten Koeffizienten der Polynome $A(q^{-1})$, $B(q^{-1})$ und $C(q^{-1})$ sind in der Tafel angegeben. Die Pole des $A(q^{-1})$-Polynoms sind schwach komplex, womit sich im p-Bereich ein physikalisch nicht interpretierbares Schwingungsglied mit einer Dämpfung nahe 1 ergibt. Über vergleichbare Probleme wird in [5] berichtet, wobei eine mangelnde Meßwertauflösung als deren Ursache vermutet wurde. Die Parameterschätzungen nach den anderen Verfahren lieferten ähnliche Schätzwerte, Konvergenzschwierigkeiten traten bei diesem Modellansatz nicht auf.

4.2. *Meßgröße: Kurswinkel ψ*

Die Kurswinkelmessung wurde Parameterschätzungen mit den Modellordnungen 2 und 3 unterworfen. Beide Modellansätze widerspiegeln gut das dynamische Verhalten des Kurswinkels (Bild 5). Allerdings ist die Übereinstimmung zwischen Modell- und Meßdaten für Modelle 3. Ordnung bedeutend besser als für solche 2. Ordnung.

Beim Modellansatz 3. Ordnung ergaben sich Unterschiede zwischen den Parameterschätzungen der einzelnen Verfahren. Sowohl beim Maximum-Likelihood-Verfahren als auch beim Hilfsvariablenverfahren traten bei Verwendung der Least-Squares-Anfangsschätzung Konvergenzschwierigkeiten auf. Ein ähnliches Verhalten bei gleichem Modellansatz wird ebenfalls in [5] beschrieben. Offensichtlich spielt hier auch die Tatsache eine Rolle, daß eine Nullstelle des $A(q^{-1})$-Polynoms sehr nahe am Einheitskreis liegt. Die Mayne-Firoozan-Methode führt dagegen auf einen festen Konvergenzpunkt, der bereits eine sehr gute Beschreibung des Prozeßverhaltens liefert. Wird dieser Parametervektor als Startvektor für die Maximum-Likelihood-Iteration benutzt, wird Konvergenz und eine weitere Verbesserung der Modellanpassung an die Meßgröße erreicht (Bild 6). Der Ordnungstest nach *Akaike* erbringt eine Bevorzugung der Ordnung 3. Die ermittelten Parameterergebnisse sind in der Tafel dargestellt. Über die Rücktransformation der zeitdiskreten Übertragungsfunktionen in den z-Bereich gelangt man zu physikalisch interpretierbaren reellen Polen im p-Bereich.

Tafel. Schätzergebnisse für die ausgewählte Meßreihe

IV Hilfsvariablenverfahren; ML Maximum-Likelihood-Methode; MF Mayne-Firoozan-Methode

	ψ, 2. Ordnung		ψ, 3. Ordnung		$\dot{\psi}$, 2. Ordnung	
	IV	ML	MF	ML	IV	ML
a_1	−1,8843	−1,8533	−2,3156	−2,2608	−1,4017	−1,4703
a_2	0,8867	0,8542	1,7446	1,6428	0,5744	0,5549
a_3			−0,4291	−0,3818		
b_1	−0,0001	−0,0071	0,0012	0,0024	0,0021	0,0009
b_2	0,0220	0,0326	0,0085	0,0057	0,0118	0,0136
b_3			0,0073	0,0104		
c_1		−0,5579	−1,1293	−1,3118		−0,5139
c_2		−0,1370	0,5519	0,4988		−0,1597
c_3			−0,0355	−0,0069		
AIC		−199,25		−230,5		
z_1	0,97291	0,99358	1,00087	0,99983	0,7458	0,7352
z_2	0,91138	0,85971	0,71567	0,75556	$\pm j0,1345$	$\pm j0,1202$
z_3			0,59904	0,50540		
k [1/s]	0,096	0,087	0,075	0,077	0,084	0,086
T_1 [s]	16,51	12,69	3,902	2,930		$\zeta = 0,84$
T_2 [s]			5,977	7,133		$\omega = 0,168$
p_1	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0		≈ 0
p_2	−0,060	−0,078	−0,256	−0,341		−0,1411
p_3			−0,167	−0,140		$\pm j0,091$

4.3. *Identifikationsmeßplatz*

Zur Erfassung und Auswertung der Meßdaten wurde ein Rechner auf K 1520-Basis mit entsprechendem Analoganschluß eingesetzt. Bei dem eingesetzten Programm zur Meßwerterfassung waren die Abtastzeit, die Zahl der aufzuzeichnenden Kanäle sowie Testsignalart und Testsignalparameter einstellbar. Bei der Funktion Handsteuerung war über Tastaturdruck die gewünschte Ruderstellung vorgebbar. An Auswerteprogrammen standen an Bord neben den eigentlichen, frei miteinander kombinierbaren Parameterschätzalgorithmen Darstellungsmöglichkeiten für die Signalverläufe und für den Vergleich der gemessenen Prozeßsignale mit entsprechenden Modellsignalverläufen (analog zu den Darstellungen in den Bildern 3 bis 6) zur Verfügung. Dadurch war die schnelle Erkennung von Fehlmessungen oder ungünstig eingestellter Testsignalparameter nach Ablauf des Meßvorgangs möglich. Alle Programmteile einschließlich der erforderlichen Echtzeitpassagen wurden einheitlich unter Verwendung des Sprachkonzepts von FORTH realisiert. Zur Anwendung kam die ausgebaute CP/M-Version comFORTH, die bereits einen Grundbefehlssatz von Matrizenoperationen als Sprachkern beinhaltet. Vorteilhaft wirkte sich beim Einsatz des Meßplatzes der interaktive Charakter der Sprache aus: Alle bei der Programmentwicklung benutzten Teilroutinen stehen dem Bediener ebenso wie der Sprachkern von FORTH selbst im Dialog vor Ort zur Verfügung.

Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wird die bereits praktizierte Vorgehensweise zur Bestimmung linearer Modelle für das Bewegungsverhalten von Schiffen beschrieben. Bei der weiteren Entwicklung der hier vorgestellten Forschungsrichtung müssen im wesentlichen die folgenden Linien berücksichtigt werden:

- Einbeziehung des Gierwinkels in das Meßkonzept (Rückrechnung auf hydrodynamische Derivate)
- Erprobung einfacher nichtlinearer Modellansätze
- Übertragung der vorgestellten Identifikationsstrategie auf Messungen an Schiffsmodellen in entsprechenden Versuchseinrichtungen
- Ausschluß von komplexen Polen in den Übertragungsfunktionen.

Literatur

[1] *Åström, K. H.; Bohlin, T.:* Numerical Identification of Linear Dynamic Systems from Normal Operating Records. Proceedings, IFAC Symposium on the Theory of Self-Adaptive Control Systems. Teddington: Plenum Press 1965.
[2] *Åström, K. J.:* Maximum-Likelihood and Prediction Error Methods. Automatica 16 (1980) pp. 551–574.
[3] *van Amerongen, J.:* Adaptive Steering of Ships. Delft University of Technology 1982.

(Fortsetzung auf Seite 358)

D. Pönigk; H.-P. Schötz

Interaktives Mikrorechnerprogrammsystem für Echtzeitidentifkationsaufgaben

0. Einleitung

Durch die Verfügbarkeit leistungsfähiger Mikrorechner, wie Büro- und Personalcomputer, sowie praktikabler Betriebssysteme bietet sich für die experimentelle Prozeßanalyse die Möglichkeit, bekannte Identifikationsalgorithmen auf diesen Rechnern zu implementieren. Derartige Rechner werden auch als dezentrale Rechner in Automatisierungsanlagen eingesetzt. Hierbei bestehen solche Forderungen, wie Echtzeitfähigkeit und Flexibilität, die für die Identifikation, z. B. bei Adaptivsystemen, von Interesse sind. Aufgrund der technischen Ausstattung industrieller Anlagen mit digitaler Informationstechnik werden für die experimentelle Identifikation diskrete (abgetastete) Prozeßsignale verwendet, die für moderne Steuerungskonzepte zu Echtzeitprozeßmodellen verarbeitet werden. Die Parameter der verwendeten diskreten Modelle (Differenzengleichungen, z-Übertragungsfunktionen) werden bevorzugt mit rekursiven Algorithmen geschätzt, wobei A-priori-Informationen unmittelbar berücksichtigt werden. Zur Ermittlung dieser Modellparameter wird der zu untersuchende Prozeß in vielen Fällen mit determinierten Testsignalen beaufschlagt. Die dadurch verursachten Ausgangssignale sowie die Eingangssignale werden zur Parameterschätzung herangezogen.

Bei der Prozeßidentifikation in industriellen Anlagen kommt es darauf an, daß die zur experimentellen Identifikation erforderlichen Testläufe bei Wahrung der Wirtschaftlichkeit der Anlage ein gutes Ergebnis liefern. Die dafür notwendigen Voraussetzungen werden durch die komplexe Betrachtung der drei Arbeitsstufen der experimentellen Identifikation

- Vorbereitung
- Durchführung
- Modellermittlung (Parameterschätzung)

geschaffen.

Der Vorbereitung eines solchen Vorhabens kommt besondere Bedeutung zu, da aussagekräftige A-priori-Informationen über Prozeßsignale und -struktur einen günstigen Einfluß auf den Verlauf und das Ergebnis der experimentellen Identifikation nehmen können. Eine qualitative Verbesserung der Startbedingungen ist u. a. durch experimentelle Voruntersuchungen an einer analog oder digital simulierten Strecke sowie am Labormodell des Prozesses zu erreichen. In den wenigsten Fällen stehen Labormodelle zur Verfügung bzw. lassen sich diese aufgrund vorliegender komplizierter Prozeßtechnologie kaum mit vertretbarem Aufwand herstellen, so daß vorranging die rechnergestützte Streckensimulation Anwendung findet.

Die weiteren Betrachtungen gelten dem Einsatz des Bürocomputers A 5120 zur Parameterschätzung bei Verwendung determinierter Testsignale.

1. Vorbetrachtungen zum Programmsystem

Gegenwärtig ist die Automatisierung von industriellen Prozessen auf Analyse- und Synthesekonzepte orientiert, für deren Realisierung die Anwendung von mikrorechentechnischen Mitteln erforderlich ist. Die der Mikrorechentechnik innewohnende Flexibilität wird neben der modularen Gerätetechnik maßgeblich durch die Softwaretechnologie mit den Bestandteilen Betriebssysteme und Programmiersprache bestimmt. Diese Flexibilität kann in einem gewissen Umfang für relevante Zielsetzungen bei der experimentellen Identifikation genutzt werden, wie dies bei der Bildung von Echtzeitprozeßmodellen der Fall ist. Für die Parameterschätzung ergeben sich beim Einsatz von Mikrorechnern einige beachtenswerte Aspekte, die sich teilweise widersprechen:

- Implementierung von Algorithmen mit geringem Speicherplatzbedarf und kurzer Rechenzeit
- Bedienerführung durch Bildschirmmenüs und Eingabefehlererkennung
- Einsatz von industriell gefertigter Rechentechnik mit in weiten Grenzen kompatiblen peripheren Geräten
- geringer Programmieraufwand durch Anwendung höherer Programmiersprachen.

Das im folgenden vorgestellte Programmpaket erfüllt weitgehend die genannten Anforderungen. Dies wird im 2. Abschnitt näher erläutert. Zum Leistungsumfang des Programmpakets zur On-line-Parameterschätzung von Echtzeitprozeßmodellen gehören:

- Sieben rekursive Parameterschätzverfahren [1]
  - RMKQ rekursive Methode der kleinsten Quadrate
  - RVMKQ rekursive verallgemeinerte Methode der kleinsten Quadrate
  - REMF rekursiver Schätzalgorithmus mit erweiterten Matrizenansätzen (2 Varianten)
  - RHVM rekursive Hilfsvariablenmethoden (3 Varianten)
- Sechs Wichtungsarten
- Fünf Umschaltkriterien.

Aus den genannten Kennwerten des Programmpakets ergibt sich u. a. die Möglichkeit, die rekursiven Parameterschätzverfahren für die Analyse zeitinvarianter und zeitvarianter Prozesse einzusetzen. Die Umschaltungen zwischen den rekursiven Parameterschätzverfahren ermöglichen Aussagen u. a. zur Konsistenz, Erwartungstreue und Wirksamkeit der einzelnen Verfahren bei verschiedenen Einflußfaktoren, wie Störungen, Drift der Parameter, Testsignale. Der Einfluß der Testsignale bezüglich solcher Kriterien wie Güte des Schätzergebnisses und Identifikationsdauer wird als bedeutungsvoll eingeschätzt und in Veröffentlichungen nachgewiesen [2] bis [5]. Aus diesem Grund wurde ein Programm zur Erzeugung von Testsignalen entwickelt, wobei folgende Aspekte berücksichtigt wurden:

- Erzeugung von mehreren Testsignalarten
  - PRS pseudostochastische Signale
  - BMFS binäre Mehrfrequenzsignale
  - WS WALSH-Signale
- Modifikation der Signalarten durch eine in gewissen Grenzen liegende Flexibilität bezüglich der Amplitudenwerte a_i, der Gundtaktzeit T_G und der Periodendauer T
- Echtzeitfähigkeit dieser entwickelten Testsignale durch eine software-kompatible Übernahme in die o. g. On-line-Parameterschätzung.

Die Betrachtungen zur Testsignalentwicklung werden im 3. Abschnitt anhand der jeweiligen Testsignalart weitergeführt.

Dipl.-Ing. *Detlef Pönigk* (29) studierte von 1978 bis 1983 an der Hochschule für Verkehrswesen „Friedrich List" Dresden Informationstechnik. Seit 1983 wissenschaftlicher Assistent an der TH Leipzig, Sektion Automatisierungsanlagen. Zur Zeit beschäftigt er sich mit Fragen der Identifikation zeitvarianter Systeme.

Dipl.-Ing. *Hans Peter Schötz* (44) studierte nach der Funkmechanikerlehre von 1962 bis 1966 an der Ingenieurschule Mittweida Hochfrequenztechnik und von 1967 bis 1973 an der TH Ilmenau, Sektion Informationstechnik und Theoretische Elektrotechnik. Nach beruflicher Tätigkeit im VEB Kombinat Fernmeldewerk Leipzig und im VEB Zentrales Projektierungsbüro der Textilindustrie Leipzig seit 1978 wissenschaftlicher Assistent an der TH Leipzig, Sektion Automatisierungsanlagen, Wissenschaftsbereich Automatisierungstechnik.

(Fortsetzung von Seite 357)

[4] *Box, G. E. P.; Jenkins, G. M.:* Time Series Analysis — Forecasting and Control. San Francisco: Holden Day 1970.
[5] *Källström, C. G.:* Identification and Adaptive Control Applied to Ship Steering. Lund Institute of Technology 1979.
[6] *Ljung, L.; Caines, P. E.:* Asymptotic Normality of Prediction Error Estimators for Approximate System Models. Stochastics 3 (1979) pp. 29–46.
[7] *Mayne, D. Q.; Firoozan, F.:* Linear Identification of ARMA Processes. Automatica 18 (1982) pp. 461–466.
[8] *Nomoto, K.; Taguchi, K.; Hirano, S.:* On the Steering Qualities of Ships. International Shipbuilding Progress 4 (1957) pp. 35.
[9] *Puls, D.:* Hydrodynamische Kräfte und Momente an Schiffen und Voraussage von Schiffsbewegungen. Seewirtschaft, Berlin 17 (1985) 11, S. 549 bis 553.
[10] *Söderström, T.; Stoica, P.:* Comparison of Some Instrumental Variable Methods — Consistency and Accuracy Aspects. Automatica 17 (1981) pp. 101–115.
msr 8684

2. Beschreibung des Programmsystems IDENTIF

Das Programmsystem ist modular aufgebaut und leicht erweiterbar. Die modulare Programmierung gestattet die Anwendung des Programms mit verschiedenen Zielstellungen. Im Bild 1 ist die Struktur des Programms bei Simulationsuntersuchungen dargestellt. Die Testsignalerzeugung erfolgt entweder intern im Programm (PRBS-Generator) oder extern mit dem Testsignalentwicklungssystem TSGEN. Die zu untersuchende Regelstrecke wird entweder digital oder analog simuliert. Für die digitale Simulation steht ein Programm zur Lösung von Differenzengleichungen zur Verfügung. Die ersten Untersuchungen mit diesem Programmpaket erfolgten mit Hilfe der digitalen Simulation. Bei Voruntersuchungen für einen praktischen Einsatzfall dieses Programmsystems stellte sich heraus, daß die digitale Simulation nicht ausreicht. Aus Gründen der Rechenzeitbelastung und Genauigkeitsforderungen wurde die Untersuchung an einer analog simulierten Regelstrecke durchgeführt. Verwendung fand dafür der Hybridanalogrechner ADT 3000, der über eine spezielle Schnittstelle an einen Bürocomputer angekoppelt wurde [9]. Die Anzeige der ermittelten Parameterschätzwerte und anderer interessierender Größen (z. B. Reststreuung, Ausgangsfehler u. ä.) erfolgt entweder in Tabellen- oder Kurvenform. Zur Auswertung der Ergebnisse stehen dem Nutzer Hilfsmittel im Programm zur Verfügung, um die interessierenden Größen in einer gewünschten Form darzustellen. Zur Erleichterung der Auswertung werden die konkreten Versuchsbedingungen (wie Art der Simulation, Testsignal, Parameterschätzverfahren, Startwerte für bestimmte Größen u. a.) mit erfaßt und können ausgedruckt werden. Eine grafische Darstellung erfolgt auf einem vollgrafischen Bildschirm (Hardware VIS 2 A) des Bürocomputers [10]. Für die Programmierung wurden Routinen einer TURTLE-Grafik verwendet, die für die Programmiersprache PASCAL auf dem Bürocomputer entwickelt wurden. Bei der Echtzeitidentifikation von Industrieobjekten erfolgt die Ein- und Ausgabe der Prozeßsignale über AD- bzw. DA-Kanäle. Hierbei wurden ähnliche AD- und DA-Wandler (12 bit) wie bei der analogen Simulation der Regelstrecke verwendet (Bild 2). Das Programmsystem wurde in der Programmiersprache PASCAL entwickelt. Es arbeitet mit dem Betriebssystem SCP auf einem Büro- bzw. Personalcomputer. Großer Wert wurde auf eine gute Dialogführung des Bedieners gelegt. Durch entsprechende Menü- und Kommandogestaltung wird der Nutzer durch das Programm geführt und erhält auf dem Bildschirm immer die Informationen über die aktuellen Versuchsbedingungen. Bei der Eingabe der Versuchsbedingungen wird dem Nutzer ein sogenanntes „Standardangebot" vorgegeben. Es enthält günstige Startwerte oder oft benutzte Werte für alle Versuchsbedingungen, z. B. Verfahren: RMKQ, Anzahl der Abtastungen: 100, Ordnung der Strecke: 2, Startwert für α: 10^4, usw. Der Nutzer braucht jetzt nur die Versuchsbedingungen einzugeben, die vom „Standardangebot" abweichen. Bei Unklarheiten über entsprechende einzugebende Größen stehen dem Nutzer erläuternde Hilfsmenüs zur Verfügung. Wegen der übersichtlichen Bedienbarkeit wurde das Programmsystem auch mit Erfolg in der Lehre eingesetzt.

Im Programmsystem wurden die im Abschnitt 1. genannten Verfahren implementiert. Genaueres über die Parameterschätzverfahren und die einzelnen Wichtungsarten siehe [1] [2] und [5].

Die Parameterschätzverfahren basieren alle auf der rekursiven Methode der kleinsten Quadrate RMKQ:

$$\hat{\boldsymbol{\Theta}}(k+1) = \hat{\boldsymbol{\Theta}}(k) + \boldsymbol{K}(k+1)\,(y(k+1) - \boldsymbol{m}^T(k+1)\,\hat{\boldsymbol{\Theta}}(k))$$

$$\begin{bmatrix}\text{neuer}\\ \text{Schätz-}\\ \text{vektor}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\text{alter}\\ \text{Schätz-}\\ \text{vektor}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\text{Bewer-}\\ \text{tungs-}\\ \text{vektor}\end{bmatrix} \begin{bmatrix}\text{neuer Meß-} & & \text{vorherge-}\\ \text{wert der} & - & \text{sagter Wert}\\ \text{Ausgangs-} & & \text{der Ausgangs-}\\ \text{größe} & & \text{größe}\end{bmatrix}$$

$$\left.\begin{aligned} \boldsymbol{K}(k+1) &= \frac{\boldsymbol{P}(k)\,\boldsymbol{m}(k+1)}{(1 + \boldsymbol{m}^T(k+1)\,\boldsymbol{P}(k)\,\boldsymbol{m}(k+1))} \\ \boldsymbol{P}(k+1) &= \boldsymbol{P}(k) - \boldsymbol{K}(k+1)\,\boldsymbol{m}^T(k+1)\,\boldsymbol{P}(k)\,, \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

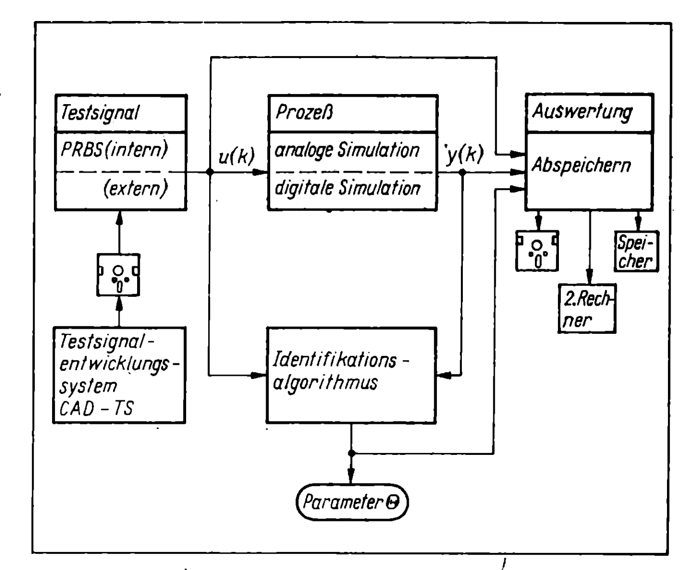


Bild 1. Programmstruktur bei Simulationsuntersuchungen

Parametervektor: $\hat{\boldsymbol{\Theta}}^T(k) = (a_1 \dots a_n, b_1 \dots b_n)$

Meßwertvektor: $\boldsymbol{m}^T(k) = (-y(k-1) \dots -y(k-n)$
$u(k-1) \dots u(k-n))$

Startwerte: $\boldsymbol{\Theta}(0) = \boldsymbol{0}, \boldsymbol{P}(0) = \alpha \cdot \boldsymbol{I}.$

Die verwendeten rekursiven Parameterschätzverfahren haben einen (1) entsprechenden Aufbau. Durch günstige Abarbeitung des Algorithmus (z. B. Vermeidung von Doppelberechnungen, spezielle Matrizenarithmetik u. ä.) wurden Rechenzeit und Speicherplatz eingespart. Bekanntlich sind die Parameterschätzverfahren ohne entsprechende Modifikation nur bedingt oder gar nicht zur Identifikation zeitvariabler Parameter geeignet. Durch Einführung von Wichtungstermen lassen sich aber driftende Parameter identifizieren. Im Programmpaket stehen 6 Modifikationen der Parameterschätzverfahren zur Verfügung

1. (P-Matrix)-Wichtung

$$\boldsymbol{P}(k+1) = \boldsymbol{P}(k) - \boldsymbol{K}(k+1)\,\boldsymbol{m}^T(k+1)\,\boldsymbol{P}(k) + \boldsymbol{P} \quad (2)$$

2. c-Wichtung

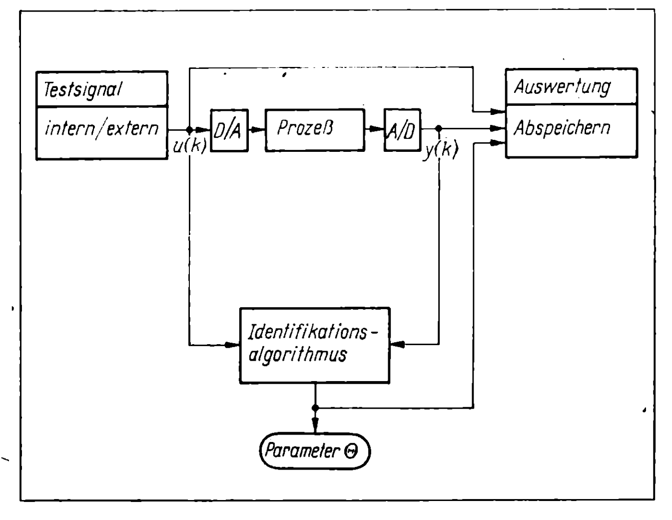
$$\boldsymbol{P}(k+1) = \frac{1}{c^2}\,(\boldsymbol{P}(k) - \boldsymbol{K}(k+1)\,\boldsymbol{m}^T(k+1)\,\boldsymbol{P}(k)) \quad (3)$$

3. konstante λ-Wichtung

$$\boldsymbol{K}(k+1) = \frac{\boldsymbol{P}(k)\,\boldsymbol{m}(k+1)}{\lambda + \boldsymbol{m}^T(k+1)\,\boldsymbol{P}(k)\,\boldsymbol{m}(k+1)} \quad (4)$$

$$\boldsymbol{P}(k+1) = \frac{1}{\lambda}\,(\boldsymbol{P}(k) - \boldsymbol{K}(k+1)\,\boldsymbol{m}^T(k+1)\,\boldsymbol{P}(k))$$

Bild 2. Programmstruktur bei Echtzeitidentifikation



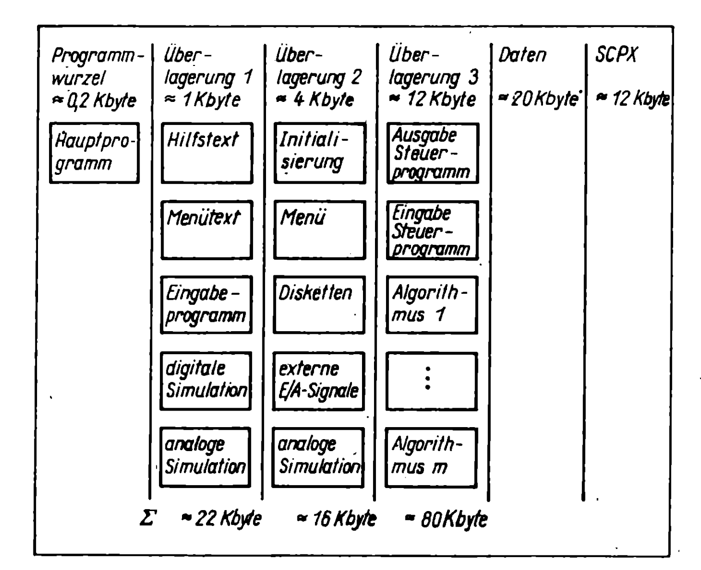


Bild 3. Speicherplatzaufteilung

4. zeitvariable λ-Wichtung

$$\lambda(k) = (1 - \beta)\,\lambda(k - 1) + \beta\lambda_\infty \tag{5}$$

5. λ-Wichtung mit variablem Gedächtnisfaktor

$$\lambda(k) = 1 - \frac{(1 - \boldsymbol{m}^T(k + 1)\,\boldsymbol{K}(k + 1))\,e^2(k + 1)}{\Sigma_0} \tag{6}$$

6. Rücksetztechnik
Nach einer bestimmten Anzahl von Abtastschritten wird die Präzisionsmatrix $\boldsymbol{P}(k)$ wieder auf den Startwert $\boldsymbol{P} = \alpha \cdot \boldsymbol{I}$ gesetzt.

Die Wichtungsarten 2. bis 5. bewirken, daß zurückliegende Meßwertpaare (Eingangsgrößen-/Ausgangsgrößenwerte) bei der Berechnung des aktuellen Schätzwertes weniger berücksichtigt werden. Mit dem Wichtungsverfahren kann eine gezielte Wichtung einzelner zeitvariabler Parameter vorgenommen werden. Durch das Rücksetzen der P-Matrix reagiert der Algorithmus wieder empfindlicher auf Parameteränderungen. Die einzelnen Wichtungsarten können bei allen Algorithmen verwendet werden. Um die Konvergenz der Parameterschätzung zu sichern oder während der Laufzeit auf starke Parameteränderungen reagieren zu können, gibt es die Möglichkeit, zwischen den einzelnen Verfahren umzuschalten. Die Umschaltung erfolgt nach einer bestimmten Abtastzeit oder entsprechend eines gewählten Kriteriums (z. B. Gleichungsfehlerquadratsumme).
So ist es z. B. möglich, eine Startschätzung mit der RMKQ durchzuführen und nach 20 bis 30 Abtastschritten mit dem Hilfsvariablenverfahren fortzufahren. Das Hilfsvariablenverfahren konvergiert dann sicherer als ohne Startschätzung mit RMKQ.
Das Programmsystem hat eine Programmgröße von 120 Kbyte. Bei der Programmierung wurde die Überlagerungstechnik eingesetzt. Drei Überlagerungsbereiche werden mit einer Programmwurzel verwendet (Bild 3). Damit ist das Programm auf einem 8-bit-Mikrorechner lauffähig.
Die Rechenzeit ist stark von der verwendeten Arithmetik abhängig. Die neueste Programmvariante arbeitet mit einer 6-byte-Gleitkommaarithmetik ohne Arithmetikprozessor. Die minimale Abtastzeit beträgt mit der RMKQ bei einem System 2. Ordnung etwa 150 ms.

Tafel 1. Periodenlänge der PRS-Folgen

Amplituden-wertigkeit	Schieberegisterlänge/Rückführungen						
	2	3	4	5	6	7	8
2	—	—	15	15	63	127	7
3	—	8	80	78	728	728	>900
5	20	31	312	24	—	—	—
7	16	57	342	—	—	—	—

3. Programmierte Testsignale

Die Erzeugung der Testsignale erfolgt mit dem Programm TSGEN und deren Anpassung an das Programm zur On-line-Parameterschätzung IDENTIF mit dem Programm TSFORM. Durch die verwendete Mikrorechentechnik ergeben sich gewisse Restriktionen für die Testsignale.
Die Testsignalentwicklung erfolgt im Dialogbetrieb. Nach erfolgter Auswahl der Signalart sowie der Festlegung der Signalparameter wird das Testsignal erzeugt und auf einer gesonderten Diskette in Form von Zahlenfolgen abgespeichert.

3.1. *Pseudostochastische Signale*

Die Erzeugung der pseudostochastischen Signalfolgen erfolgt mit rückgekoppelten Schieberegistern. Im Programm TSGEN wurde dieses Prinzip für drei Schieberegister implementiert. Für die Rückführung gilt die Verknüpfung durch Addition modulo w, wobei die Rückführung aus programmtechnischen Gründen immer von der ersten und letzten Schieberegisterstufe erfolgt. Hierdurch lassen sich nicht in jedem Fall Impulsfolgen maximaler Länge erreichen, so daß allgemein für die Periodenlänge N gilt

$$N \leqq 2^{\varkappa}(p^r - 1)\,. \tag{7}$$

r Stufenzahl des Schieberegisters; p Wertigkeit des Schieberegisters, gleichbedeutend mit der Anzahl der Amplitudenwerte des Testsignals; $\varkappa$ ganzzahliger Faktor im Rahmen einer verallgemeinerten Theorie pseudostochastischer Signale [11] (hier $\varkappa = 0$)
Für die Periodendauer T mit der Grundtaktzeit T_G gilt

$$T = NT_G\,. \tag{8}$$

Mit dieser Schieberegisterstruktur (Bild 4) können Amplitudenwerte

$$p \leqq 7 \tag{9}$$

erzeugt werden. Die Periodenlänge N wird durch die Länge des Schieberegisters in Verbindung mit der „starren" Rückführung bestimmt, so daß 18 pseudostochastische Signalfolgen nach Tafel 1 zur experimentellen Untersuchung zur Verfügung stehen. Damit liegen der Frequenzabstand $\Delta\omega$ und die Grundfrequenz ω_G im Amplitudenspektrum der Signalfolgen fest

$$\Delta\omega = \omega_g = \frac{1}{NT_G}\,. \tag{10}$$

Um den Einfluß der Grundtaktzeit T_G, die sich beim konstantem N auf die „Bandbreite" im Amplitudenspektrum auswirkt, zu untersuchen, wurde im Programm TSFORM ein Zeitfaktor K_G eingeführt, wodurch ganzzahlige Vielfache der Grundtaktzeit T_G eingestellt werden können.

3.2. *Binäre Mehrfrequenzsignale (BMFS)*

Durch eine bestimmte Struktur von binären Signalfolgen läßt sich erreichen, daß im Frequenzspektrum dieser Signale Frequenzen mit signifikanter Signalleistung existieren; das bringt für die experimentelle Identifikation Vorteile, die sich im Ergebnis niederschlagen können. Der Entwurf der BMFS basiert in vielen Fällen auf Verfahren nach [7] bzw. hieraus abgeleitete, modifizierte Verfahren. Der rechnerische Aufwand zur Konstruktion dieser Signale ist erheblich. Deshalb sind im Programm TSGEN sieben BMFS in einer Signalbibliothek verfügbar, die nach einem modifizierten Verfahren berechnet wurden [8]. Im Amplitudenspektrum derartiger BMF-Bibliothekssignale sind die relativen Frequenzen n_j enthalten, so daß mit dem Abruf dieser Signale mit einer Grundtaktzeit T_G die absolute Frequenz f_a festliegt

$$f_a = \frac{n_j}{NT_G}\,. \tag{11}$$

3.3. *Walsh-Signale*

Die Walsh-Funktionen bilden ein vollständiges orthogonales System mit den entsprechenden Bildungsgesetzen [11]. Für die Walsh-Funktion gilt

$$w(t) = W \cdot \mathrm{wal}((\Phi, T_B), t/T_B + t_0/T_B))\,. \tag{12}$$

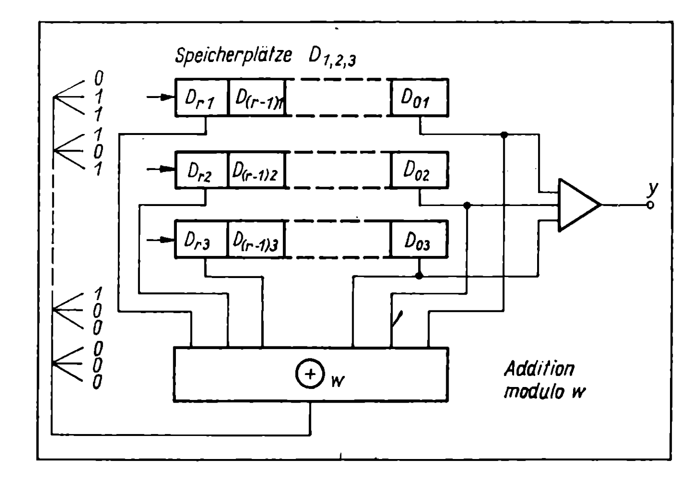


Bild 4. Struktur eines programmierbaren PRS-Generators

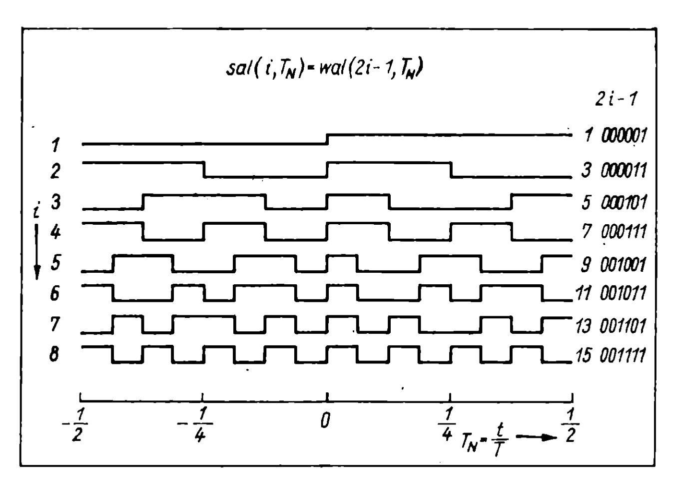


Bild 5. Walsh-Funktionssystem der sal(i, T_N)

W Amplitude, zweiwertig $+1$ oder -1; Φ Sequenz; t_0 Verzögerung; T_B Zeitbasis

Mit $t_0 = 0$ und der Definition einer normierten Sequenz

$$i = \Phi T_B \tag{13}$$

und der normierten Zeit

$$T_N = \frac{t}{T_B} \tag{14}$$

ergibt sich die Form

$$w(t) = W\,\mathrm{wal}(i, T_N)\,. \tag{15}$$

In einem Walsh-System der Ordnung $N_0 = 2^k$ existieren dann genau N_0 Walsh-Funktionen. Aufgrund der Orthogonalität läßt sich dieses Funktionssystem in die beiden Halbsysteme der geraden und ungeraden Funktionen

$$\mathrm{wal}(2i, T_N) = \mathrm{cal}(i, T_N)\,, \tag{16}$$

$$\mathrm{wal}(2i-1, T_N) = \mathrm{sal}(i, T_N) \tag{17}$$

unterteilen. Die Walsh-Funktion

$$\mathrm{wal}(2^{k-1}, T_N); \qquad k = 1, 2, 3, \ldots \tag{18}$$

stellt die periodische Rademacher-Funktion dar. Des weiteren lassen sich alle Walsh-Funktionen als Produkte von Rademacher-Funktionen darstellen. In [11] wurde eine Definitionsgleichung in Form einer Differenzengleichung entwickelt, die zu einer sequenzgeordneten Reihenfolge führt

$$\mathrm{wal}(2j + q, T_N) = (-1)^{[j/2]^* + q}\,\{\mathrm{wal}(j, 2(T_N + 1/4)) + (-1)^{j+q}\,\mathrm{wal}(j, 2(T_N - 1/4))\}\,, \tag{19}$$

wobei

$$\mathrm{wal}(0, T_N) = \begin{cases} 1 & \text{für} \quad -1/2 \leqq T_N < 1/2 \\ 2 & \text{für} \quad T_N < -1/2\,, \quad T_N \geqq 1/2\,, \end{cases}$$

mit $q = 0$ oder 1;

$j = 0, 1, 2, \ldots;$

$[j/2]^*$ größte ganze Zahl kleiner oder gleich $j/2$.

Die Symmetrieeigenschaften der Walsh-Funktionen wirken sich vorteilhaft auf die numerische Berechnung der Frequenzspektren aus. Weiterhin ist für Untersuchungen der Zusammenhang zwischen der normierten Sequenz i und der normierten Periodenlänge N_p wichtig. So gilt für die im Programmsystem TSGEN vorgesehene ungerade Walsh-Funktion nach (17) für die normierte Periodenlänge

$$N_p = \frac{N}{2^{q-1}}\,. \tag{20}$$

Hierzu läßt sich der Wert q aus der Binärdarstellung der Sequenz i angeben, und zwar ist $i_q = 0$ der erste verschwindende Koeffizient, wenn gilt:

$$i = i_0 2^0 + i_1 2^1 + \ldots + i_{q-1} 2^{q-1} + i_q 2^q + i_{q+1} 2^{q+1} + \ldots + i_{m-1} 2^{m-1}\,. \tag{21}$$

m Anzahl der notwendigen Binärstellen zur Binärdarstellung von i

In der Tafel 2 sind die normierte Periodenlängen für die Walsh-Funktion wal$(1, T_N)$ bis wal$(16, T_N)$ dargestellt. Im Programmpaket TSGEN ist das Walsh-Funktionssystem entsprechend Bild 5 als Bibliothek enthalten. Aufgrund der erläuterten Gesetzmäßigkeiten stehen für die experimentelle Identifikation vier verschiedene normierte Periodenlängen

$$N_p \in \left\{N, \frac{N}{2}, \frac{N}{4}, \frac{N}{8}\right\} \text{ (Tafel 2)}$$

und vier verschiedene Grundtakte

$$T_G \in \{T_G, 2T_G, 4T_G, 8T_G\}$$

zur Auswahl.

Tafel 2. Normierte Periodenlängen der Walsh-Funktionen

wal(i, T_N)-Funktion	normierte Periodenlänge N_p
wal$(1, T_N)$ wal$(2, T_N)$	N
wal$(3, T_N)$, wal$(4, T_N)$	$N/2$
wal$(5, T_N)$, wal$(6, T_N)$	N
wal$(7, T_N)$, wal$(8, T_N)$	$N/4$
wal$(9, T_N)$, wal$(10, T_N)$	N
wal$(11, T_N)$, wal$(12, T_N)$	$N/2$
wal$(13, T_N)$, wal$(14, T_N)$	N
wal$(15, T_N)$, wal$(16, T_N)$	$N/8$

Zusammenfassung

Es wurde ein Programmsystem vorgestellt, das die prozeßnahe Anwendung von On-line-Identifikationsverfahren mit dem Bürocomputer ermöglicht. Für die experimentelle Identifikation steht ein Testsignalprogramm zur Verfügung. Dieses Programmpaket ist besonders zur Echtzeitidentifikation zeitinvarianter und zeitvarianter Prozesse geeignet. Das Testsignalprogramm gestattet eine interaktive Auswahl günstiger Testsignalfolgen.

Literatur

[1] *Wede, J.; Werner, D.:* Echtzeitprozeßmodelle auf der Basis von Parameterschätzverfahren. Band 214 der REIHE AUTOMATISIERUNGSTECHNIK. Berlin: VEB Verlag Technik 1985.
[2] *Buchta, H.:* Zur Parameterschätzung linearer dynamischer Modelle unter Verwendung periodischer Testsignale. msr, Berlin 26 (1983) 12, S. 676 bis 685.
[3] *Mehra, R. K.:* Optimal inputs for linear system identification. IEEE Trans. on Automatic Control AC-19 (1974) 3, S. 192–200.
[4] *Grisse, H. J.:* Über den Einfluß des anregenden Testsignals auf die Ergebnisse von Parameterschätzverfahren. Regelungstechnik 31 (1983) 11, S. 361 bis 368.
[5] *Werner, D.:* Rekursive Echtzeitparameterschätzverfahren bei nicht optimalen Eingangsgrößen. msr, Berlin 28 (1985) 3, S. 98–101.
[6] *Henderson, K. W.:* Some notes on WALSH functions. IEEE Trans. EC-13 (1964) S. 50–52.
[7] *Strobel, H.:* Experimentelle Systemanalyse. Berlin: Akademie-Verlag 1975.
[8] *Paehlike, K.-D:* Regelstreckenidentifikation mit binären Mehrfrequenzsignalen. Dissertation, TH Aachen 1980.
[9] *Hoppe, K.; Ehrlich, H.:* Mikrorechnerarbeitsplatz für regelungstechnische Aufgaben. msr, Berlin 28 (1985) 1, S. 5–7.
[10] Beschreibung Grafikdisplay GDM 183. AdW der DDR, Zentrum für wissenschaftlichen Gerätebau, Berlin 1984.
[11] *Harmuth, H. F.:* Transmission of information by orthogonal functions. Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag 1972.

msr 8687

H. Buchta

Zweistufiges Verfahren zur Identifikation linearer dynamischer Systeme vom SISO-Typ für kurzperiodische Testfolgen

0. Einleitung

Bei der Gestaltung einer Strategie zur Identifikation technischer oder nichttechnischer Systeme mittels prozeßrechnergesteuerter aktiver Experimentation unter Verwendung eines Mikrorechners haben sich in vielen Fällen eine algorithmische Dekomposition sowie der Übergang zur Mehrstufigkeit von Verfahren bewährt, um im Sinne eines Kompromisses einerseits die rechentechnischen Anforderungen und andererseits die statistischen Eigenschaften der geschätzten Parameter günstig zu beeinflussen [1] bis [6].

Hier wird ein zweistufiges Verfahren zur Ermittlung einvariabler, zeitinvarianter, linearer dynamischer Modelle bei Verwendung kurzperiodischer Testfolgen hinsichtlich seiner Eigenschaften detaillierter untersucht und unter Beachtung rechentechnischer Gesichtspunkte als CAD-Mittel algorithmisch aufbereitet. Durch Auswertung von Faltungsbeziehungen im direkten oder indirekten Zeitbereich für den stationären Zustand werden in einer ersten Stufe pseudoparametrische Modelle, die mit Gewichtsfolgemodellen verwandt sind, gewonnen. In einer zweiten Stufe werden diese Modelle parametrisiert und daraus Differenzengleichungs- oder z-Übertragungsfunktionsmodelle kontinuierlich wirkender Systeme abgeleitet.

Beide Stufen — in der Regel werden sie, sieht man z. B. von [7] ab, getrennt behandelt (vgl. [8] bis [10] und dort zitierte Basisliteratur), zumal ausgereifte Alternativen existieren, um auf direktem Wege parametrische Modelle zu erhalten [8] [6] und [5] — basieren auf bekannten Algorithmen, die zum gängigen Repertoire der Prozeßanalyse gehören, und sind unter bestimmten Voraussetzungen auch unabhängig voneinander einsetzbar.

Im folgenden werden beide Stufen als Bausteine eines Verfahrens betrachtet, da

- die Verwendung kurzperiodischer Testfolgen zu einer wesentlichen algorithmischen Vereinfachung der ersten Stufe führt, gleichzeitig aber Fehlinterpretationen der Ergebnisse möglich sind, so daß die zweite Stufe anzuschließen ist
- zur Beurteilung des dynamischen Verhaltens von Systemen häufig auf ein nichtparametrisches Gewichtsfolgemodell, im direkten Wege gemäß erster Stufe ermittelt, zurückgegriffen wird und nachträglich — ohne das Ausgangsdatenmaterial noch zur Verfügung zu haben — für Aufgaben z. B. der Regelkreissynthese ein parametrisches Modell, also die zweite Stufe, benötigt wird
- dieses zweistufige Verfahren eine Ergänzung der in [5] formulierten Zugänge bei Nutzung des dafür bereits vorliegenden Modulvorrats darstellt.

Zur Experimentation werden vorgefertigte, kurzperiodische binäre (PRBS) sowie einfache ternäre (PRTS) Testfolgen mit Periodenlängen $l \leqq 19$ verwendet, wie sie in [3] für Verfahren im Zeit- bzw. Spektralbereich mit Meßwertverdichtung [5] vorgeschlagen wurden (vgl. auch [11]).

1. Erste Stufe des Verfahrens

Für das Eingangs-/Ausgangsverhalten eines gestörten linearen Systems gelten bei diskontinuierlicher Signalverarbeitung (Abtastperiode Δt) die Beziehungen

$$y[n] = y^0[n] + z[n] = \sum_{i=0}^{\infty} g[i]\, u[n-i] + z[n] \qquad (1)$$

und

$$R_{uy}[\lambda] = \sum_{i=0}^{\infty} g[i]\, R_u[\lambda - i] \qquad (2)$$

mit

$\{u[n]\}$	vorgegebene Testfolge am Systemeingang,
$\{y^0[n]\}$, $\{y[n]\}$	wahre bzw. gemessene Wertefolge am Systemausgang,
$\{z[n]\}$	am Systemausgang wirkende Störfolge; Realisierung eines mittelwertfreien, stationären, ergodischen Zufallsprozesses $Z[n]$ mit unbekannter Autokorrelationsfolge $\{R_z[\lambda]\}$,
$\{R_u[\lambda]\}$, $\{R_{uy}[\lambda]\}$	zugeordnete, verallgemeinerte Auto- bzw. Kreuzkorrelationsfolge, wobei $\{R_{uz}[\lambda]\} \equiv \{0\}$,
$\{g[n]\}$	wahre Gewichtsfolge des Systems mit bekannter Ordnung m.

Werden auf (1) oder (2) Modelldarstellungen begründet, ergeben sich entsprechende Algorithmen im direkten oder indirekten Zeitbereich.

1.1. *Algorithmus im direkten Zeitbereich*

Das (1) entsprechende Modell ist

$$\hat{y}[n] = \sum_{i=0}^{p-1} \hat{g}[i]\, u[n-i] = \boldsymbol{\lambda}^T[n]\, \hat{\boldsymbol{g}} \qquad (3)$$

mit

$$\hat{\boldsymbol{g}} = (\hat{g}[0], \hat{g}[1], \dots, \hat{g}[p-1])^T$$

und

$$\boldsymbol{\lambda}[n] = (u[n], u[n-1], \dots, u[n-p+1])^T$$

für $n = k, k+1, \dots, k+N-1$, wobei k zu Beginn des stationären Zustands Null gesetzt wird. p ist die Anzahl der Werte der Stützfolge $\{\hat{g}[n]\}$ des Modells.

Da die Testfolge $\{u[n]\}$ die Periodenlänge l hat, sind auch $\{y^0[n]\}$ und $\{\hat{y}[n]\}$ mit l periodisch.

Wird über μ Perioden der Länge l im stationären Zustand experimentiert ($N = \mu l$; $T = N\Delta t$) und $\{\hat{y}[n]\}$ mittels $\{\hat{g}[n]\}$ im Sinne der MKQ an $\{y[n]\}$ angepaßt, so stehen p Freiheitsgrade zur Steuerung von l Werten der Folge $\{\hat{y}[n]\}$ zur Verfügung. Aus (1) und (3) resultiert

$$\hat{\boldsymbol{g}} = (\Lambda^T \Lambda)^{-1} \Lambda^T \boldsymbol{y} \qquad (4)$$

mit

$$\Lambda = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\lambda}^T[0] \\ \vdots \\ \boldsymbol{\lambda}^T[\mu l - 1] \end{pmatrix}$$

und

$$\boldsymbol{y} = (y[0], \dots, y[\mu l - 1])^T$$

oder die oft zitierte Form, z. B. [8] und [9],

$$\hat{\boldsymbol{g}} = \begin{pmatrix} R_u[0] & R_u[1] & \dots & R_u[p-1] \\ & R_u[0] & \dots & R_u[p-2] \\ \text{symm.} & & \ddots & \vdots \\ & & & R_u[0] \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \hat{R}_{uy}[0] \\ \hat{R}_{uy}[1] \\ \vdots \\ \hat{R}_{uy}[p-1] \end{pmatrix}. \qquad (5)$$

Wird in (5) das Prinzip der Meßwertmittelung [3] und [5] eingeführt, wird wegen

$$R_u[\lambda] = \frac{1}{l} \sum_{n=0}^{l-1} u[n-\lambda]\, u[n] \qquad (6)$$

und

$$\hat{R}_{uy}[\lambda] = \frac{1}{l} \sum_{n=0}^{l-1} u[n-\lambda]\, \bar{y}[n] \qquad (7)$$

mit

$$\bar{y}[n] = \frac{1}{\mu} \sum_{r=1}^{\mu} y[n + l(r-1)]; \qquad n = 0, 1, \dots, l-1 \qquad (8)$$

Doz. Dr.-Ing. *Helmut Buchta* (51) studierte von 1953 bis 1960 an der Fakultät für Elektrotechnik der TH Dresden, Fachrichtung Regelungstechnik. 1967 Promotion an der TU Dresden, Fachgebiet Analyse zufälliger Signale. 1960 bis 1968 wissenschaftlicher Assistent bzw. Oberassistent im Institut für Regelungstechnik der TH/TU Dresden. 1973 bis 1974 Arbeitsaufenthalt am Moskauer Energetischen Institut, Lehrstuhl für Automatisierungstechnik. 1975 bis 1978 kommissarischer Leiter des WB Regelungstechnik und Prozeßsteuerung der TU Dresden; dort seit 1969 Hochschuldozent, Spezialgebiet Prozeßanalyse.

eine wesentliche Vereinfachung des Algorithmus und damit eine neuartige datenreduzierte Darstellung

$$\hat{\boldsymbol{g}} = (\boldsymbol{U}_\mathrm{p}^T \boldsymbol{U}_\mathrm{p})^{-1} \boldsymbol{U}_\mathrm{p}^T \bar{\boldsymbol{y}} \tag{9}$$

mit

$$\boldsymbol{U}_\mathrm{p} = \begin{pmatrix} u[0] & u[-1] & \dots & u[-p+1] \\ u[1] & u[0] & \dots & u[-p+2] \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ u[l-1] & u[l-2] & \dots & u[-p+l] \end{pmatrix} \tag{10}$$

und

$$\bar{\boldsymbol{y}} = (\bar{y}[0], \bar{y}[1], \dots, \bar{y}[l-1])^T \tag{11}$$

erhalten.

Die Algorithmen (4), (5) und (9) sind identisch, gestatten jedoch eine unterschiedlich anschauliche Einsicht in Zusammenhänge sowie in ihrer rechentechnischen Realisierung eine bedeutende Beeinflussung des Aufwands.

Da die verallgemeinerte Kovarianzmatrix in (5) positiv definit sein muß, gilt $p \leqq q \leqq l$, also

$$\mathrm{Rg}\boldsymbol{\Lambda} = \mathrm{Rg}\boldsymbol{U}_\mathrm{p} = p \leqq q \leqq l\,, \tag{12}$$

wobei q die Anzahl der „Frequenzen" bezeichnet, die im diskreten Spektrum von $\{u[n]\}$ enthalten sind [8] und [3].

Durch $\hat{\boldsymbol{g}}$ wird $\{g[n]\}$, $n = 0, 1, \dots, p-1$, in (1) nur dann erwartungstreu und konsistent geschätzt, wenn $\{u[n]\}$ bestimmte Bedingungen hinsichtlich der Spektraleigenschaften erfüllt. Diskretes weißes Rauschen genügt diesen Bedingungen vollständig. Ist $\{u[n]\}$ periodisch, so folgt im stationären Zustand aus (9)

– für den Erwartungswert

$$M[\hat{\boldsymbol{G}}] = (\boldsymbol{U}_\mathrm{p}^T \boldsymbol{U}_\mathrm{p})^{-1} \boldsymbol{U}_\mathrm{p}^T \boldsymbol{y}^0 \tag{13}$$

mit

$$\boldsymbol{y}^0 = (y^0[0], \dots, y^0[l-1])^T$$

und wegen

$$\boldsymbol{y}^0 = \boldsymbol{U}_\mathrm{l}\boldsymbol{g}^0\,, \tag{14}$$

wobei

$$\boldsymbol{g}^0 = (g^0[0], g^0[1], \dots, g^0[l-1])^T$$

und

$$g^0[i] = \sum_{\nu=0}^{\infty} g[i+\nu l]; \qquad i = 0, 1, \dots, l-1 \tag{15}$$

unter Voraussetzung der absoluten Summierbarkeit von $g[n]$,

$$M[\hat{\boldsymbol{G}}] = \begin{cases} (\boldsymbol{U}_\mathrm{p}^T \boldsymbol{U}_\mathrm{p})^{-1} \boldsymbol{U}_\mathrm{p}^T \boldsymbol{U}_\mathrm{l}\boldsymbol{g}^0 & \text{für } p < q = l \\ & \text{bzw. } p \leqq q < l \\ \boldsymbol{g}^0 \quad \text{für } p = q = l\,, \end{cases} \tag{16}$$

also

$$M[\hat{G}[n]] \neq g[n]\,, \qquad n = 0, 1, \dots, p-1 \tag{17}$$

– für die Kovarianzmatrix

$$\mathrm{cov}\,\hat{\boldsymbol{G}} = \frac{1}{\mu^2} (\boldsymbol{U}_\mathrm{p}^T \boldsymbol{U}_\mathrm{p})^{-1} \boldsymbol{U}_\mathrm{p}^T \boldsymbol{S} \boldsymbol{U}_\mathrm{p} (\boldsymbol{U}_\mathrm{p}^T \boldsymbol{U}_\mathrm{p})^{-1} \tag{18}$$

mit

$$\boldsymbol{S} = \mu\, \boldsymbol{\Sigma}_{11} + \sum_{\lambda=2}^{\mu} (\mu + 1 - \lambda)\, (\boldsymbol{\Sigma}_{1\lambda} + \boldsymbol{\Sigma}_{1\lambda}^T)\,, \tag{19}$$

wenn

$$\boldsymbol{\Sigma}_\mathrm{z} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\Sigma}_{11} & \dots & \boldsymbol{\Sigma}_{1\mu} \\ \vdots & & \vdots \\ \boldsymbol{\Sigma}_{\mu 1} & \dots & \boldsymbol{\Sigma}_{\mu\mu} \end{pmatrix} \tag{20}$$

mit

$$\boldsymbol{\Sigma}_\mathrm{ij} = \boldsymbol{\Sigma}_\mathrm{ji}^T\,; \qquad (l, l)\text{-Matrizen}\,,$$

und

$$\boldsymbol{\Sigma}_{1\lambda} = \boldsymbol{\Sigma}_{2,\lambda+1} = \dots = \boldsymbol{\Sigma}_{\mu-\lambda+1,\mu}$$

die $(\mu l, \mu l)$-Kovarianzmatrix der i. allg. autokorrelierten Störung $\boldsymbol{z} = (z[0], z[1], \dots, z[\mu l - 1])^T$ ist.

Die Schätzungen $\hat{g}[n]$ sind also bezüglich $g[n]$ nicht erwartungstreu und nicht konsistent, aber bei absoluter Summierbarkeit von $R_\mathrm{z}[\lambda]$ wegen $\lim_{\mu\to\infty} \mathrm{cov}\,\hat{\boldsymbol{G}} = \boldsymbol{0}$ hinsichtlich $M[\hat{G}[n]]$ konsistent.

Aus (16) sind konkrete Aussagen über den auftretenden Bias ableitbar. (18) kann zur Definition von Effektivitätsmaßen dienen, (20) kann, falls a priori bekannt, in Verbindung mit (4) zur Konstruktion einer biasbehafteten Markov-Schätzung benutzt werden.

Für die zur Identifikation verwendete Testfolge wird im stationären Zustand der Erwartungswert der periodischen Modellausgangsfolge i. allg. zu

$$M[\hat{\boldsymbol{Y}}] = \boldsymbol{U}_\mathrm{p}(\boldsymbol{U}_\mathrm{p}^T \boldsymbol{U}_\mathrm{p})^{-1} \boldsymbol{U}_\mathrm{p}^T \boldsymbol{U}_\mathrm{l}\boldsymbol{g}^0 \neq \boldsymbol{y}^0 = \boldsymbol{U}_\mathrm{l}\boldsymbol{g}^0 \tag{21}$$

erhalten. Nur unter bestimmten Bedingungen, die hier nicht angegeben werden und die auf allgemeinere Situationen der Modellverifikation erweitert wurden, gilt in (21) die Gleichheit. Das Modell nach (3) ist testfolgeabhängig; das Identifikationsproblem ist dem noch wenig entwickelten Gebiet der Approgression [12] zuzuordnen.

Obwohl ein Bias in $\hat{\boldsymbol{g}}$ nachteilig sein kann, ist dieser Zugang nutzbar, da einerseits mit (15) und (16) dessen Einfluß beurteilt werden kann (vgl. Abschn. 1.3.), andererseits zur Vermeidung grober Fehlinterpretationen des Modells die zweite Stufe des Verfahrens zur Verfügung steht.

Insbesondere für kurzperiodische Testfolgen (PRBS/PRTS mit $l \leqq 19$) eröffnet der Algorithmus (9) einen rechentechnisch vorteilhaften Weg:

1. Meßwertmittelung von $y[n]$, $n = 0, 1, \dots, \mu l - 1$, im stationären Zustand in l Kanälen nach (8)
2. Berechnung von $\hat{g}[n]$, $n = 0, 1, \dots, p-1$, entsprechend (9), jedoch als

$$\hat{\boldsymbol{g}} = \boldsymbol{A}_{(\mathrm{p},\mathrm{l})}\, \bar{\boldsymbol{y}} \tag{22}$$

unter Verwendung vorgefertigter, für die jeweilige Testfolge $\{u[n]\}$ der Periodenlänge l in einem Katalog gespeichert vorliegender Matrizen

$$\boldsymbol{A}_{(\mathrm{p},\mathrm{l})} = (\boldsymbol{U}_\mathrm{p}^T \boldsymbol{U}_\mathrm{p})^{-1} \boldsymbol{U}_\mathrm{p}^T\,. \tag{23}$$

Die Erstellung des Kataloges ist problemlos ohne Rechnereinsatz möglich, da $(\boldsymbol{U}_\mathrm{p}^T \boldsymbol{U}_\mathrm{p})^{-1}$ für PRBS und PRTS allgemeingültig notiert werden kann.

1.2. *Algorithmus im indirekten Zeitbereich*

Das (2) entsprechende Modell ist

$$\hat{R}_\mathrm{uy}[\lambda] = \sum_{i=0}^{p-1} \hat{g}_\mathrm{R}[i]\, R_\mathrm{u}[\lambda - i] \tag{24}$$

und es gilt

$$\hat{\boldsymbol{g}}_\mathrm{R} = (\boldsymbol{\Lambda}_\mathrm{R}^T \boldsymbol{\Lambda}_\mathrm{R})^{-1} \boldsymbol{\Lambda}_\mathrm{R}^T \hat{\boldsymbol{R}}_\mathrm{uy} \tag{25}$$

mit

$$\boldsymbol{\Lambda}_\mathrm{R} = \begin{pmatrix} R_\mathrm{u}[0] & R_\mathrm{u}[1] & & R_\mathrm{u}[p-1] \\ R_\mathrm{u}[1] & R_\mathrm{u}[0] & \dots & R_\mathrm{u}[p-2] \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ R_\mathrm{u}[\nu-1] & R_\mathrm{u}[\nu-2] & \dots & R_\mathrm{u}[\nu-p] \end{pmatrix},$$

$$\hat{\boldsymbol{R}}_\mathrm{uy} = (\hat{R}_\mathrm{uy}[0], \hat{R}_\mathrm{uy}[1], \dots, \hat{R}_\mathrm{uy}[\nu-1])^T$$

für

$$p \leqq \nu \leqq l\,, \qquad p \leqq q \leqq l\,. \tag{26}$$

Werden (7) und (10) eingeführt, folgt

$$\hat{\boldsymbol{g}}_\mathrm{R} = \begin{cases} (\boldsymbol{U}_\mathrm{p}^T \boldsymbol{U}_\nu \boldsymbol{U}_\nu^T \boldsymbol{U}_\mathrm{p})^{-1} \boldsymbol{U}_\mathrm{p}^T \boldsymbol{U}_\nu \boldsymbol{U}_\nu^T \bar{\boldsymbol{y}} & \text{für } p < \nu \leqq l\,, \\ (\boldsymbol{U}_\mathrm{p}^T \boldsymbol{U}_\mathrm{p})^{-1} \boldsymbol{U}_\mathrm{p}^T \bar{\boldsymbol{y}} = \hat{\boldsymbol{g}} & \text{für } \nu = p\,. \end{cases} \tag{27}$$

Allgemein wird für den Erwartungswert

$$M[\hat{\boldsymbol{G}}_\mathrm{R}] = (\boldsymbol{U}_\mathrm{p}^T \boldsymbol{U}_\nu \boldsymbol{U}_\nu^T \boldsymbol{U}_\mathrm{p})^{-1} \boldsymbol{U}_\mathrm{p}^T \boldsymbol{U}_\nu \boldsymbol{U}_\nu^T \boldsymbol{U}_\mathrm{l} \boldsymbol{g}^0 \tag{28}$$

und für die Kovarianzmatrix

$$\mathrm{cov}\,\hat{\boldsymbol{G}}_\mathrm{R} = \frac{1}{\mu^2} (\boldsymbol{U}_\mathrm{p}^T \boldsymbol{U}_\nu \boldsymbol{U}_\nu^T \boldsymbol{U}_\mathrm{p})^{-1} \boldsymbol{U}_\mathrm{p}^T \boldsymbol{U}_\nu \boldsymbol{U}_\nu^T \boldsymbol{S} \times \\ \times \boldsymbol{U}_\nu \boldsymbol{U}_\nu^T \boldsymbol{U}_\mathrm{p} (\boldsymbol{U}_\mathrm{p}^T \boldsymbol{U}_\nu \boldsymbol{U}_\nu^T \boldsymbol{U}_\mathrm{p})^{-1} \tag{29}$$

erhalten. Für $\nu = p$ ist die Identität mit dem Algorithmus nach Abschn. 1.1. offensichtlich; hinsichtlich der Eigenschaften von $\hat{g}_\mathrm{R}[n]$ gelten entsprechend die Aussagen von Abschn. 1.1.

Insbesondere für kurzperiodische Testfolgen (PRBS/PRTS mit $l \leqq 19$) eröffnet der Algorithmus (27) einen rechentechnisch vorteilhaften Weg:

1. Meßwertmittelung von $y[n]$, $n = 0, 1, \dots, \mu l - 1$, im stationären Zustand in l Kanälen nach (8)
2. Berechnung von $\hat{g}_R[n]$, $n = 0, 1, \dots, p - 1$, entsprechend (27), jedoch als

$$\hat{\boldsymbol{g}}_R = \boldsymbol{B}_{(p,l,\nu)} \cdot \bar{\boldsymbol{y}} \tag{30}$$

unter Verwendung vorgefertigter, für die jeweilige Testfolge $\{u[n]\}$ der Periodenlänge l in einem Katalog gespeichert vorliegender Matrizen

$$\boldsymbol{B}_{(p,l,\nu)} = \begin{cases} (\boldsymbol{U}_p^T \boldsymbol{U}_\nu \boldsymbol{U}_\nu^T \boldsymbol{U}_p)^{-1} \boldsymbol{U}_p^T \boldsymbol{U}_\nu \boldsymbol{U}_\nu^T & \text{für} \quad p < \nu \leqq l \\ \boldsymbol{A}_{(p,l)} \quad \text{für} \quad \nu = p . \end{cases} \tag{31}$$

Die Erstellung des Kataloges ist problemlos ohne Rechnereinsatz möglich, da $(\boldsymbol{U}_p^T \boldsymbol{U}_\nu \boldsymbol{U}_\nu^T \boldsymbol{U}_p)^{-1} \boldsymbol{U}_p^T \boldsymbol{U}_\nu$ für PRBS und PRTS allgemeingültig notiert werden kann.

Da

- Untersuchungen an ausgewählten Beispielen unter vergleichbaren Bedingungen zeigten, daß die Effektivität der Schätzungen (22) und (30) in starkem Maße von den korrelativen Eigenschaften der Störfolge abhängt,
- bisher keine allgemeingültigen Relationen zwischen (18) und (29), abgesehen von Sonderfällen (z. B. für unkorrelierte Störungen, für $\nu = p$ (27), für PRTS mit $p \leqq q = l - 1$ gilt $\boldsymbol{B}_{(p,l,l)} = \boldsymbol{A}_{(p,l)}(!)$) gefunden werden konnten,

ist es nicht möglich, einen der beiden Algorithmen zu priorisieren. Hier leisten die rechentechnisch günstigen Darstellungen (22) und (30) als CAD-Werkzeuge eine bedeutende Hilfe bei der experimentellen Entscheidungsfindung, weil beim Übergang vom direkten in den indirekten Zeitbereich oder umgekehrt lediglich vorgefertigte Matrizen auszuwechseln sind.

Allerdings haben zwei Sonderfälle bei kurzperiodischen Testfolgen eine überragende Bedeutung im Sinne der vollen Nutzung der verfügbaren Information zur Erzeugung der maximal möglichen Anzahl von Stützwerten $\hat{g}[n]$ bzw. $\hat{g}_R[n]$ des Modells. Es gilt nämlich

- für PRBS mit $p = q = \nu = l$

$$\boldsymbol{A}_{(l,l)} = \boldsymbol{B}_{(l,l,l)} = \boldsymbol{U}_l^{-1} \tag{32}$$

- für PRTS mit $p = q = l - 1$, $\nu = l$ oder $l - 1$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{A}_{(l-1,l)} &= \boldsymbol{B}_{(l-1,l,l)} = \boldsymbol{B}_{(l-1,l,l-1)} = \\ &= (\boldsymbol{U}_{l-1}^T \boldsymbol{U}_{l-1})^{-1} \boldsymbol{U}_{l-1}^T .\end{aligned} \tag{33}$$

Die Schätzregeln im direkten und indirekten Zeitbereich sind unter diesen Bedingungen identisch!

1.3. *Parametrische Modelle*

Wird dem System eine wahre Modellstruktur mit der z-Übertragungsfunktion $F^*(z, \hat{\boldsymbol{a}})$ m-ter Ordnung bei einfachen Polen unterstellt (eine Erweiterung auf mehrfache Pole wird wegen der Annahme einer Wahrscheinlichkeit Null für ihr Auftreten hier nicht betrachtet), so gilt für nicht sprungfähige Systeme

$$\begin{aligned}F^*(z, \hat{\boldsymbol{a}}) &= \frac{\hat{b}_1 z^{m-1} + \hat{b}_2 z^{m-2} + \dots + \hat{b}_m}{z^m + \hat{a}_1 z^{m-1} + \dots + \hat{a}_m} = \\ &= \sum_{i=1}^{m} \frac{\hat{\beta}_i}{z - \hat{\alpha}_i} .\end{aligned} \tag{34}$$

Das System hat also die wahre Gewichtsfolge

$$g[n] = \begin{cases} 0 \quad \text{für} \quad n = 0 \\ \sum_{i=1}^{m} \beta_i \alpha_i^{n-1} \quad \text{für} \quad n = 1, 2, \dots \end{cases} \tag{35}$$

Da nach (15)

$$g^0[n] = \sum_{i=1}^{m} \beta_i \frac{\alpha_i^{n-1}}{1 - \alpha_i^l} \tag{36}$$

für $n = 1, 2, \dots, l$ mit $g^0[l] \equiv g^0[0]$ folgt, können aus (16) bzw. (28) parametrische Darstellungen, die mit parametrischen Gewichtsfolgen verwandt sind, gewonnen werden.

Allgemein werden

a) *im direkten Zeitbereich*

$$M[\hat{G}[n]] = \Delta + \sum_{i=1}^{m} \frac{\beta_i}{1 - \alpha_i^l} \alpha_i^{n-1} \tag{37}$$

für $n = 1, 2, \dots, p - 1, l$

mit

$$M[\hat{G}[l]] \equiv M[\hat{G}[0]] ,$$

$$\Delta = \frac{1}{\delta} \sum_{i=1}^{m} \beta_i \frac{\alpha_i^{l-1} - \alpha_i^{p-1}}{(1 - \alpha_i)(1 - \alpha_i^l)}$$

und

$$\delta = \begin{cases} l - p + 1 & \text{für} \quad \text{PRBS}, \quad p \leqq l \\ l - p & \text{für} \quad \text{PRTS}, \quad p \leqq l - 1 \end{cases}$$

b) *im indirekten Zeitbereich*

$$M[\hat{G}_R[n]] = \Delta_R + \sum_{i=1}^{m} \frac{\beta_i}{1 - \alpha_i^l} \alpha_i^{n-1} \tag{38}$$

für $n = 1, 2, \dots, p - 1, l$

mit

$$M[\hat{G}_R[l]] \equiv M[\hat{G}_R[0]] ,$$

$$\Delta_R = \frac{1}{\delta_1} \sum_{i=1}^{m} \beta_i \frac{\delta_2(\alpha_i^{l-1} + \alpha_i^{\nu-1} - 2\alpha_i^{p-1}) - \nu(\alpha_i^{l-1} - \alpha_i^{p-1})}{(1 - \alpha_i)(1 - \alpha_i^l)}$$

und

- für PRBS, $p \leqq \nu \leqq l$

$$\delta_1 = (l + 1)(l - 2p + 1) + p\nu , \qquad \delta_2 = l + 1$$

- für PRTS, $p \leqq \nu \leqq l - 1$ oder $p \leqq l - 1$, $\nu = l$

$$\delta_1 = l^2 - 2pl + p\nu , \qquad \delta_2 = l$$

erhalten.

Für die in (32) und (33) genannten wichtigen Sonderfälle gilt:

- PRBS mit $p = q = \nu = l$

$$M[\hat{G}[n]] = M[\hat{G}_R[n]] = \sum_{i=1}^{m} \frac{\beta_i}{1 - \alpha_i^l} \alpha_i^{n-1} \tag{39}$$

für $n = 1, 2, \dots, l$ mit $M[\hat{G}[l]] \equiv M[\hat{G}[0]]$

- PRTS mit $p = q = l - 1$, $\nu = l$ oder $l - 1$

$$M[\hat{G}[n]] = M[\hat{G}_R[n]] = \sum_{i=1}^{m} \frac{\beta_i}{1 - \alpha_i^l} (\alpha_i^{n-1} - \alpha_i^{l-2}) \tag{40}$$

für $n = 1, 2, \dots, l - 2, l$ mit $M[\hat{G}[l]] \equiv M[\hat{G}[0]]$.

Die parametrischen Darstellungen (37) bis (40)

- ermöglichen Aussagen über den Bias in Abhängigkeit von der Periodenlänge l und — über die α_i implizit — von der Abtastperiode Δt
- können mit $\alpha_i, \beta_i := \hat{\alpha}_i, \hat{\beta}_i$ als parametrische Modelle aufgefaßt und in der zweiten Stufe des Verfahrens zur Parameterschätzung genutzt werden.

Aus (37) bis (40) sowie (35) ist ersichtlich, daß die geschätzten Stützfolgen mit $T_0 = l \cdot \Delta t \to \infty$ asymptotisch erwartungstreu sind.

2. Zweite Stufe des Verfahrens

Obwohl es aufgrund des geringen Datenumfangs ($p \leqq l$) naheliegt, MKQ-Algorithmen unter Verwendung des Ausgangsfehlers einzusetzen, wird wegen des dazu erforderlichen rechentechnischen Aufwands (parameternichtlineares Problem, Suchverfahren [7]) und der algorithmischen Einheitlichkeit (vgl. erste Stufe) vorgeschlagen, am verallgemeinerten Fehler orientierte Algorithmen (parameterlineares Problem) zu benutzen. Da zusätzlich der Hauptanteil des Bias durch die kurzperiodischen Testfolgen in der ersten Stufe entsteht — die zufälligen Fehler in $\{\hat{g}[n]\}$ bzw. $\{\hat{g}_R[n]\}$ werden dort asymptotisch eliminiert —, wird des weiteren auf MKQ-Algorithmen verzichtet, die biasreduzierte oder asymptotisch biasfreie Parameterschätzungen erzeugen [6], [8] und [13].

Nachfolgend werden für die zweite Stufe zwei Zugänge empfohlen, die als CAD-Werkzeuge alternativ einsetzbar sind und die in [5] genannten Forderungen weitgehend erfüllen.

2.1. *Modifizierter MKQ-Algorithmus mit verallgemeinertem Fehler*

Aus den parametrischen Darstellungen (37) und (38) ergeben sich mit

$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{1 - \alpha_i^l} \quad (41)$$

„zentrierte" Folgen $\{\varphi[n]\}$, die gemäß

$$\varphi[n] = M[\hat{G}[n]] - \Delta = \sum_{i=1}^{m} \gamma_i \alpha_i^{n-1} \quad (42)$$

bei fallspezifischer Anfügung des Index R als Gewichtsfolgen ($n = 0, 1, \dots, p - 1$) zur z-Übertragungsfunktion

$$\tilde{F}^*(z, \tilde{a}) = \frac{\tilde{b}_0 z^m + \tilde{b}_1 z^{m-1} + \dots + \tilde{b}_m}{z^m + a_1 z^{m-1} + \dots + a_m} \quad (43)$$

aufzufassen sind. Der Übergang zu einem Ersatzmodell $\tilde{F}^*(z, \hat{\hat{a}})$ (vgl. (34)) führt mit

$$\hat{\varphi}[n] = \hat{g}[n] - \hat{\Delta} \quad (44)$$

und

$$u[n] = \begin{cases} 1 & \text{für } n = 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (45)$$

auf ein i. allg. überbestimmtes System von p Differenzengleichungen, das im Sinne der MKQ hinsichtlich der $2m + 2$ Parameter

$$\hat{a}^{(m)} = (\hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_m)^T ,$$

$$\hat{c}^{(m+1)} = (\hat{c}_1, \hat{c}_2, \dots \hat{c}_{m+1},)^T$$

und

$$\hat{c}_{m+2} = (1 + \sum_{i=1}^{m} \hat{a}_i) \hat{\Delta} \quad (46)$$

zu lösen ist, wobei

$$\hat{c}_\lambda = \hat{\hat{b}}_{\lambda-1} + (1 + \sum_{i=0}^{\lambda-1} \hat{a}_i) \hat{\Delta} \quad (47)$$

für $\lambda = 1, 2, \dots, m + 1$ mit $\hat{a}_0 \equiv 0$ gilt. Zur Lösbarkeit sind die Bedingungen (12) und (26) im allgemeinen Fall durch

$$p \geqq 2m + 2 \quad (48)$$

zu verschärfen.
Die expliziten Schätzregeln lauten in rechentechnisch vorteilhafter Form

$$\hat{a}^{(m)} = - \{\Phi_2^T[I - 1(1^T 1)^{-1} 1^T] \Phi_2\}^{-1} \times \times \Phi_2^T[I - 1(1^T 1)^{-1} 1^T] \varphi_2 , \quad (49)$$

$$\hat{c}^{(m+1)} = \varphi_1 + \Phi_1 \hat{a}^{(m)} \quad (50)$$

und

$$\hat{c}_{m+2} = (1^T 1)^{-1} 1^T (\varphi_2 + \Phi_2 \hat{a}^{(m)}) , \quad (51)$$

wobei

$$\Phi_1 = \begin{pmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \hat{g}[0] & & \cdot \\ \vdots & \ddots & \cdot \\ \cdot & & 0 \\ \hat{g}(m-1] & \dots & \hat{g}[0] \end{pmatrix}, \quad \varphi_1 = \begin{pmatrix} \hat{g}[0] \\ \vdots \\ \hat{g}[m] \end{pmatrix}, \quad (52)$$

$$\Phi_2 = \begin{pmatrix} \hat{g}[m] & \dots & \hat{g}[1] \\ \vdots & & \vdots \\ \hat{g}[p-2] & \dots & \hat{g}[p-m-1] \end{pmatrix}, \quad \varphi_2 = \begin{pmatrix} \hat{g}[m+1] \\ \vdots \\ \hat{g}[p-1] \end{pmatrix} \quad (53)$$

sowie

$$1 = (1, 1, \dots, 1)^T_{(p-m-1)} ,$$

$$I \text{ Einheitsmatrix} , \quad (p - m - 1, p - m - 1) ,$$

also

$$1^T 1 = p - m - 1$$

und

$$\text{Rg}\{I - 1(1^T 1)^{-1} 1^T\} = p - m - 2 \geqq m ,$$

bezeichnen.
Damit ergeben sich für den modifizierten MKQ-Algorithmus mit verallgemeinertem Fehler folgende Schritte:

1. Übernahme der p Stützwerte $\hat{g}[n]$ bzw. $\hat{g}_R[n]$ aus der ersten Stufe in (52) und (53)
2. Berechnung von $\hat{a}^{(m)}$, $\hat{c}^{(m+1)}$ und $\hat{c}_{m+2}$ nach (49) bis (51)
3. Bestimmung von $\hat{\hat{b}}^{(m+1)}$ aus (47) mit (46) zu

$$\hat{\hat{b}}_{\lambda-1} = \hat{c}_\lambda - \frac{1 + \sum_{i=0}^{\lambda-1} \hat{a}_i}{1 + \sum_{i=1}^{m} \hat{a}_i} \cdot \hat{c}_{m+2} \quad (54)$$

für $\lambda = 1, 2, \dots, m + 1$ mit $\hat{a}_0 \equiv 0$

4. Partialbruchzerlegung von $\tilde{F}^*(z, \hat{\hat{a}})$ (vgl. (43)) und Ermittlung von $\hat{\alpha}_i$, $\hat{\gamma}_i$ für $i = 1, 2, \dots, m$ (vgl. (42))
5. Berechnung der $\hat{\beta}_i$, $i = 1, 2, \dots, m$, nach

$$\hat{\beta}_i = (1 - \hat{\alpha}_i^l) \hat{\gamma}_i \quad \text{(vgl. (41))} \quad (55)$$

6. Formulierung des parametrischen Modells

$F^*(z, \hat{a})$ gemäß (34) .

Die Parameterschätzungen in den Schritten 2. bis 6. sind durchgängig explizit, aber nichtlinear und damit biasbehaftet.
Werden die statistischen Eigenschaften der in der ersten Stufe geschätzten Stützwerte (vgl. Schritt 1.) beachtet, ist ersichtlich, daß das zweistufige Verfahren (Abschn. 1. und 2.1.) mit $\mu \to \infty$ asymptotisch erwartungstreue und konsistente Schätzungen der Modellparameter im Ansatz (34) liefert, falls m die wahre Modellordnung ist.
Bemerkt sei, daß

- der Algorithmus durch Einführung von Stützwertdifferenzen unter Beibehaltung von $2m + 2$ Parametern bedeutend verkürzt werden kann
- das Problem auf $2m + 1$ Parameter reduzierbar ist, wenn $\hat{g}[0]$ formal Null gesetzt wird.

Entsprechende Versionen liegen beim Autor vor.
Von Bedeutung ist der Sonderfall PRBS mit $p = q = v = l$ (39), da hierbei die Verschiebung Δ in (42) a priori Null ist. Der Algorithmus wird rigoros vereinfacht:

1'. Übernahme der l Stützwerte $\hat{g}[n]$ für $n = 1, 2, \dots, l$ mit $\hat{g}[0] \equiv \hat{g}[l]$ aus der ersten Stufe in

$$\Phi_1 = \begin{pmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \hat{g}[1] & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \ddots & \cdot \\ \hat{g}[m-1] & \dots \hat{g}[1] & 0 \end{pmatrix}, \quad \varphi_1 = \begin{pmatrix} \hat{g}[1] \\ \vdots \\ \hat{g}[m] \end{pmatrix} \quad (56)$$

und

$$\Phi_2 = \begin{pmatrix} \hat{g}[m] & \dots & \hat{g}[1] \\ \vdots & & \vdots \\ \hat{g}[l-1] & \dots & \hat{g}[l-m] \end{pmatrix}, \quad \varphi_2 = \begin{pmatrix} \hat{g}[m+1] \\ \vdots \\ \hat{g}[l] \end{pmatrix} \quad (57)$$

mit

$$2m \leqq p = q = v = l \quad (58)$$

2'. Berechnung von $\hat{a}^{(m)}$ und $\hat{\hat{b}}^{(m)}$ nach

$$\hat{a}^{(m)} = -(\Phi_2^T \Phi_2)^{-1} \Phi_2^T \varphi_2 \quad (59)$$

und

$$\hat{\hat{b}}^{(m)} = \varphi_1 + \Phi_1 \hat{a}^{(m)} \quad (60)$$

3'. entfällt
4'. Partialbruchzerlegung von

$$\tilde{F}^*(z, \hat{a}) = \frac{\hat{\hat{b}}_1 z^{m-1} + \hat{\hat{b}}_2 z^{m-2} + \dots + \hat{\hat{b}}_m}{z^m + \hat{a}_1 z^{m-1} + \dots + \hat{a}_m} \quad (61)$$

und Ermittlung von $\hat{\alpha}_i$, $\hat{\gamma}_i$ für $i = 1, 2, \dots, m$

5'. wie 5.
6'. wie 6.

2.2. *Modifizierter Algorithmus des Prony-Verfahrens*

Das Verfahren nach *Prony* (siehe z. B. [14]) wurde in [10] und [15] aufbereitet und ausführlich untersucht. Hier bietet sich

Tafel. Ergebnisse der Parameterschätzung für das Beispiel (einmalige Identifikation mit identischem Datenmaterial)

Verfahren	$\hat{a}_1$	$\hat{a}_2$	$\hat{b}_1$	$\hat{b}_2$	$\hat{V}$
zweistufig (Abschn. 1. und 2.1.)	−1,1976	0,3499	0,2700	0,1890	3,0146
zweistufig (Abschn. 1. und 2.2.)	−1,1976	0,3499	0,2694	0,1902	3,0177
MKQ-MWM	−1,1981	0,3483	0,2723	0,1898	3,0753
wahre Werte	−1,19	0,343	0,27	0,189	3

dessen Verwendung wegen der statistischen Eigenschaften der geschätzten Stützfolge (erste Stufe), allerdings in modifizierter Form, an.

Für den modifizierten Algorithmus des Prony-Verfahrens ergeben sich unter den Bedingungen (26) und (48) folgende Schritte:

1. Übernahme der Stützwerte $\hat{g}[n]$ bzw. $\hat{g}_R[n]$ aus der ersten Stufe in (53)
2. Berechnung von $\hat{\boldsymbol{a}}^{(m)}$ und $\hat{c}_{m+2}$ nach (49) und (51) und daraus Bestimmung von $\hat{\alpha}_i$, $i = 1, 2, \ldots, m$, sowie (46)

$$\hat{\Delta} = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{m} \hat{a}_i} \cdot \hat{c}_{m+2} \qquad (62)$$

3. Lösung des Gleichungssystems

$$\begin{bmatrix} \hat{\alpha}_1^{l-1} & \hat{\alpha}_2^{l-1} & \ldots & \hat{\alpha}_m^{l-1} \\ 1 & 1 & \ldots & 1 \\ \hat{\alpha}_1 & \hat{\alpha}_2 & \ldots & \hat{\alpha}_m \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \hat{\alpha}_1^{p-2} & \hat{\alpha}_2^{p-2} & \ldots & \hat{\alpha}_m^{p-2} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\gamma}_1 \\ \vdots \\ \hat{\gamma}_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{g}[0] - \hat{\Delta} \\ \hat{g}[1] - \hat{\Delta} \\ \vdots \\ \hat{g}[p-1] - \hat{\Delta} \end{pmatrix} \qquad (63)$$

als MKQ-Problem bezüglich $\hat{\gamma}_i$, $i = 1, 2, \ldots, m$

4. Berechnung der $\hat{\beta}_i$, $i = 1, 2, \ldots, m$, nach (55)
5. Formulierung des parametrischen Modells $F^*(z, \hat{\boldsymbol{a}})$ gemäß (34).

Hinsichtlich der statistischen Eigenschaften des zweistufigen Verfahrens (Abschn. 1. und 2.2.) gelten die Aussagen entsprechend Abschn. 2.1. Auch dieser Algorithmus kann für Stützwertdifferenzen aufbereitet werden. Weiterhin ist es möglich, eine algorithmische Variante zur Schätzung der γ_i auf einer Vorhersage der $\hat{g}[n]$ zu begründen.

Treten im Schritt 2. konjugiert komplexe Polpaare ($\hat{\alpha}_i$, $\hat{\alpha}_{i+1}$) auf, ist (63) problemlos modifizierbar, um ein reellwertiges Gleichungssystem zu erhalten.

Ist die Verschiebung Δ a priori Null (Sonderfall (39)), gilt die wesentliche Vereinfachung nach (57) und (59) sowie in (63) $\hat{\Delta} \equiv 0$.

3. Beispiel

Ein kontinuierlich wirkendes System (Verzögerungsglied 2. Ordnung) mit dem Zeitkonstantenverhältnis $T_1/T_2 = 2$ und der statischen Verstärkung $V = 3$ hat, werden ein Halteglied nullter Ordnung und eine Abtastperiode $\Delta t = 0{,}7133 T_2$ gewählt, eine wahre z-Übertragungsfunktion

$$F^*(z, \boldsymbol{a}) = \frac{b_1 z + b_2}{z^2 + a_1 z + a_2}$$

mit $a_1 = -1{,}19$, $a_2 = 0{,}343$, $b_1 = 0{,}27$ und $b_2 = 0{,}189$. Unter den experimentellen Bedingungen:

* PRBS mit $u[n] = +1$ oder -1; $p = q = \nu = l = 7$; $\mu = 100$; $N = 700$
* $\{z[n]\}$ gaußverteilte, unkorrelierte Störfolge mit $m_z = 0$; $\sigma_z = 0{,}10$
* Störpegel $\eta = 5\sigma_z/(y^0_{max} - y^0_{min}) \approx 50\%$ (!)

wurden bei Verwendung identischen Datenmaterials mit dem zweistufigen Verfahren die in der Tafel angegebenen Parameterschätzungen erhalten; zum Vergleich sind die Ergebnisse bei Einsatz der MKQ mit Meßwertmittelung (MKQ-MWM, vgl. [3] und [5]) aufgeführt.

Zusammenfassung

Der Beitrag bereitet ein zweistufiges Verfahren zur Identifikation linearer Systeme für kurzperiodische Testfolgen und eine Experimentation im stationären Zustand auf. Dazu wird für die erste Stufe, in der nichtparametrische Modelle gewonnen werden, die mit Gewichtsfolgemodellen lediglich verwandt sind, ein neuartiger datenreduzierter Algorithmus angegeben. Durch Modifikation bekannter algorithmischer Zugänge werden in der zweiten Stufe z-Übertragungsfunktionsmodelle abgeleitet.
Um beurteilen zu können, inwieweit beide Stufen getrennt benutzbar sind, stehen Aussagen zu statistischen Eigenschaften der Schätzungen, insbesondere zum auftretenden Bias, zur Verfügung. Die Ausführungen zu den parametrischen Modellen sollen den Anwender auch auf mögliche Fehlinterpretationen sog. Gewichtsfolgemodelle, erhalten durch einen separaten Einsatz der ersten Stufe bei ähnlichen Experimentationsbedingungen, aufmerksam machen.

Literatur

[1] *Buchta, H.; Behrens, B.:* Parameterschätzung bei nichtlinearen statischen Modellen mit impliziter Struktur. msr, Berlin 25 (1982) 8, S. 427–431.
[2] *Buchta, H.:* Strategien zur vereinfachten Auswertung von Experimenten am Beispiel der Identifikation statischer Systeme. msr, Berlin 26 (1983) 2, S. 62–66.
[3] *Buchta, H.:* Zur Parameterschätzung linearer dynamischer Modelle unter Verwendung periodischer Testsignale. msr, Berlin 26 (1983) 12, S. 684–690.
[4] *Buchta, H.; Ullrich, T.:* Zur Parameterschätzung linearer dynamischer Modelle durch prozeßrechnergesteuerte aktive Experimentation. 5. Arbeitstagung „Algorithmisierte Prozeßanalyse", 26. bis 27. September 1984, Dresden, Akademie der Wissenschaften der DDR, Zentralinstitut für Kybernetik und Informationsprozesse, Berlin 1984.
[5] *Buchta, H.:* Zur Identifikation technischer Automatisierungsobjekte durch aktive Experimentation. Wiss. Z. der Technischen Universität Dresden 35 (1986) 1, S. 87–90.
[6] *Isermann, R.:* Prozeßidentifikation. Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag 1974.
[7] *Martin, K.:* Ein Beitrag zur Kennwertermittlung an linearen Systemen unter Benutzung von binären Pseudorauschsignalen. Dissertation A, TU Dresden 1975.
[8] *Eykhoff, P.:* System identification. London/New York/Sydney/Toronto: John Wiley & Sons 1974.
[9] *Strobel, H.:* Experimentelle Systemanalyse. Berlin: Akademie-Verlag 1975.
[10] *Lacroix, A.:* Systemidentifikation mit dem Prony-Verfahren. Regelungstechnik und Prozeß-Datenverarbeitung 21 (1973) 5, S. 150–157.
[11] *Wede, J.; Werner, D.:* Echtzeitprozeßmodelle auf der Basis von Parameterschätzverfahren. Band 214 der REIHE AUTOMATISIERUNGSTECHNIK. Berlin: VEB Verlag Technik 1985.
[12] *Bandemer, H.; Näther, W.:* Theorie und Anwendung der optimalen Versuchsplanung. Band II. Berlin: Akademie-Verlag 1980.
[13] *Thiele, G.:* Über verschiedene Ansätze und Konsistenzeigenschaften von Algorithmen zur Identifikation nach dem Prony-Verfahren. Report Nr. 28 FS Dynamische Systeme, Universität Bremen 1980.
[14] *Ludwig, R.:* Methoden der Fehler- und Ausgleichsrechnung. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften 1969.
[15] *Thiele, G.:* Zur Identifikation mit Hilfe des Prony-Verfahrens bei fehlerbehafteten Messungen. Report Nr. 8 FS Dynamische Systeme, Universität Bremen 1979.
msr 8688

Ch. Döschner; J. Knorr

Eine Variante der Identifikation multivariabler Systeme im geschlossenen Regelkreis unter Nutzung der Strukturinformation

0. Einleitung

Die verfügbare Mikrorechentechnik ermöglicht unter Einbeziehung von Prozeßkoppeleinrichtungen die Realisierung anspruchsvoller Prozeßsteueralgorithmen auch für multivariable Systeme. Für den Entwurf dieser Algorithmen sind entsprechende dynamische Prozeßmodelle erforderlich, die am günstigsten unter Nutzung dieser Rechner mit echtzeitorientierten Parameterschätzverfahren gewonnen werden. Die Berücksichtigung multivariabler Prozesse wirft dabei Probleme bezüglich der großen Anzahl auftretender Parameter und der Rechenzeit derartiger Algorithmen für die Einhaltung der Echtzeitbedingungen auf.
Durch die gleichzeitige Nutzung der theoretischen und experimentellen Prozeßanalyse wird im folgenden ein Algorithmus zur Identifikation multivariabler Systeme vorgestellt, der die o. g. Schwierigkeiten reduziert und ohne große Probleme auch zur Identifikation im geschlossenen Kreis angewendet werden kann.
Dieser Algorithmus nutzt die durch die theoretische Analyse gewonnene Strukturinformation über den Prozeß zur Dekomposition der Schätzprobleme und weist damit im Vergleich zu anderen Verfahren günstigere Echtzeitrechenbedingungen und eine reduzierte Anzahl von Schätzparametern im einzelnen Schätzschritt auf.

1. Modellgewinnung

1.1. Theoretische Analyse und Diskretisierung

Als Objekte für das hier angegebene Verfahren sollen kontinuierliche Prozesse mit linearisierbarem Verhalten, konzentrierbaren und zeitinvarianten Parametern betrachtet werden. Diese Prozesse sind vor allem in der Verfahrenstechnik in großer Zahl zu finden. Da im weiteren Probleme der Echtzeitmodellbildung verfolgt werden, kann in bestimmtem Maße die Forderung der Prozeßzeitinvarianz abgeschwächt werden. Die theoretische Analyse berücksichtigt alle Speicher- und Transportvorgänge von Stoff bzw. Energie in einem Prozeß. Diese Beziehungen werden unter Ausnutzung der Erhaltungssätze für Masse, Energie und Impuls in Bilanzgleichungen festgehalten, die alle für den jeweiligen Prozeß relevanten Eingangs-, Zustands- und Ausgangsgrößen enthalten.
Nach der Formulierung der erforderlichen Gleichungen und der Linearisierung wird ein multivariables Prozeßmodell gewonnen, das die durch die Dekomposition des Prozesses ermittelte Struktur beinhaltet. [1] Dieses Modell weist aber aufgrund ungenügender Kenntnis der Stoffkonstanten und vieler anderer notwendiger Vereinfachungen große Parameterfehler auf. Es läßt sich u. a. in folgender Matrizengleichung darstellen:

$$\begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{z}}(t) \\ \boldsymbol{y}_A(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A}_{zz} & \boldsymbol{A}_{zy} \\ \boldsymbol{A}_{yz} & \boldsymbol{A}_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{z}(t) \\ \boldsymbol{y}_A(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{B}_z \\ \boldsymbol{B}_y \end{bmatrix} \boldsymbol{u}(t) \tag{1}$$

Hierbei stellen $\boldsymbol{z}(t)$ den vollständigen Zustandsvektor und $\boldsymbol{y}_A(t)$ einen Vektor von Ausgangsgrößen mit Nichtzustandscharakter dar. Die Strukturinformation ist durch die Besetzung der Matrizen $\boldsymbol{A}$ und $\boldsymbol{B}$ mit konstanten, nichtverschwindenden Elementen gegeben. (1) kann z. B. auch als Signalflußgraph des Prozeßmodells interpretiert werden.

Zur Verarbeitung des Modells im Digitalrechner ist dessen Diskretisierung erforderlich. Nach Umformung (siehe [2] und [3]) und unter Berücksichtigung eines Formiergliedes ergibt sich folgendes Differenzengleichungssystem:

$$\left.\begin{aligned} z_1(k) &= a_{11} z_1(k-1) + \dots + a_{1n} y_{n-r}(k-1) + \\ &\quad + b_{11} u_1(k-1) + \dots + b_{1m} u_m(k-1) \\ &\vdots \\ z_r(k) &= a_{r1} z_1(k-1) + \dots + a_{r,n} y_{n-r}(k-1) + \\ &\quad + b_{r1} u_1(k-1) + \dots + b_{r,m} u_m(k-1) \\ y_1(k) &= a_{r+1,1} z_1(k) + \dots + a_{r+1,n} y_{n-r}(k) + \\ &\quad + b_{r+1,1} u_1(k) + \dots + b_{r+1,m} u_m(k) \\ &\vdots \\ y_{n-r}(k) &= a_{n,1} z_1(k) + \dots + a_{n,n-1} y_{n-r-1} + \\ &\quad + b_{n,1} u_1(k) + \dots + b_{n,m} u_m(k) \,. \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

Im folgenden sollen die Zustände $z_1(k)$ bis $z_r(k)$ und die Ausgangsgrößen $y_1(k)$ bis $y_{n-r}(k)$ zum Vektor $\boldsymbol{y}(k)$ zusammengefaßt werden. In den zum Modell gehörigen Parametern a_{ij} und b_{kl} ist die sinnvoll festgelegte Abtastzeit berücksichtigt. Die Wahl der Abtastzeit beeinflußt maßgeblich die Genauigkeit des resultierenden Modells und kann zu numerischen Problemen führen. Die hier angegebene Strukturdarstellung des multivariablen Systems ist im Vergleich zum Klemmen- und Zustandsmodell als die allgemeinere Modellform anzusehen, da sie neben den Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Zustands-, Eingangs- und Ausgangsgrößen auch Abhängigkeiten zwischen den Ausgangsgrößen berücksichtigt. Nur bei Verschwinden der Untermatrizen $\boldsymbol{A}_{yy}$ und $\boldsymbol{A}_{zy}$ in (1) ist dieses Modell identisch mit der Zustandsraumbeschreibung.

1.2. Schätzstrategie unter Nutzung der Strukturinformation

Durch zeilenweise Interpretation von (2) kann ein Algorithmus zur Schätzung der Parameter angegeben werden, wie er auch bei Eingrößensystemen üblich ist. Unter dem Aspekt der Einfachheit und leichten Handhabbarkeit der Algorithmen im Verhältnis zur erreichbaren Modellgenauigkeit wird auf die Methode der rekursiven Parameterschätzung auf der Basis der Minimierung der Fehlerquadrate zurückgegriffen. Zur Verbesserung der Konsistenz der Schätzung bei größeren, gaußverteilten Störeinflüssen kann die Methode der Hilfsvariablen ohne wesentliche Komplizierung eingesetzt werden.
Das Vorgehen analog zur Eingrößenschätzung wird möglich, da die gewählte Strukturdarstellung die Formulierung eines Parameterschätzproblems für jede Zeile von (2) erlaubt. Eine spezielle Bedingung ist dabei lediglich die gleichzeitige Übernahme aller vom Prozeß im jeweiligen Tastschritt benötigten Signale.
Für die Zustandsgrößen von (2) kann unter dem Gesichtspunkt der Realisierung eines parameterlinearen Identifikationsproblems folgender Gleichungsfehler angegeben werden:

$$e_{G_i}(k) = z_{p_i}(k) - \boldsymbol{m}_i^T(k)\,\hat{\boldsymbol{p}}_i(k-1) \tag{3}$$

mit

$$\boldsymbol{m}_i^T(k) = [z_{p_i}(k-1)\; z_{M1}(k-1) \dots y_{Mn-r}(k-1)\; u_1(k-1) \dots \\ \dots u_m(k-1)] \tag{4}$$

und

$$\hat{\boldsymbol{p}}_i(k-1) = [a_{ii} \quad a_{i1} \quad \dots \quad a_{in} \quad b_{i1} \quad \dots \quad b_{im}]. \tag{5}$$

Prinzipiell kann gesagt werden: Wenn es gelingt, ein Fehlersignal $e_{Gi}(k)$ zu definieren, in dem alle Größen bestimmt bzw. gemessen werden können und das Parameterlinearität aufweist, kann mit den üblichen Schätztechniken erfolgreich gearbeitet werden.
Abweichend von dem in der Literatur häufig zu findenden Aufbau des Meßwertvektors $\boldsymbol{m}_i^T(k)$ sind hier neben den meßbaren Prozeßgrößen $z_{pi}(k-1)$ und $u_1(k-1)$ bis $u_m(k-1)$ auch die

---

Doz. Dr. sc. techn. *Christian Döschner* (50) studierte von 1956 bis 1961 Regelungstechnik und Feinmechanik an der TH Dresden. Von 1961 bis 1977 als wissenschaftlicher Mitarbeiter, Assistent und Oberassistent an der Sektion Technische Kybernetik und Elektrotechnik (TK/ET) der TH „Otto von Guericke" Magdeburg. 1968 Promotion A. Von 1977 bis 1978 Zusatzstudium am Moskauer Chemisch-technologischen Institut. 1977 Promotion B. Von 1978 bis 1981 Gruppenleiter im VEB GRW Teltow. 1981 Berufung zum Hochschuldozenten an die TH (jetzt TU) Magdeburg, Sektion TK/ET.

Dipl.-Ing. *Jürgen Knorr* (31) studierte von 1978 bis 1984 im Fernstudium an der TH „Otto von Guericke" Magdeburg. Seit 1984 planmäßiger Aspirant an der TH (jetzt TU) Magdeburg, Sektion Technische Kybernetik und Elektrotechnik.

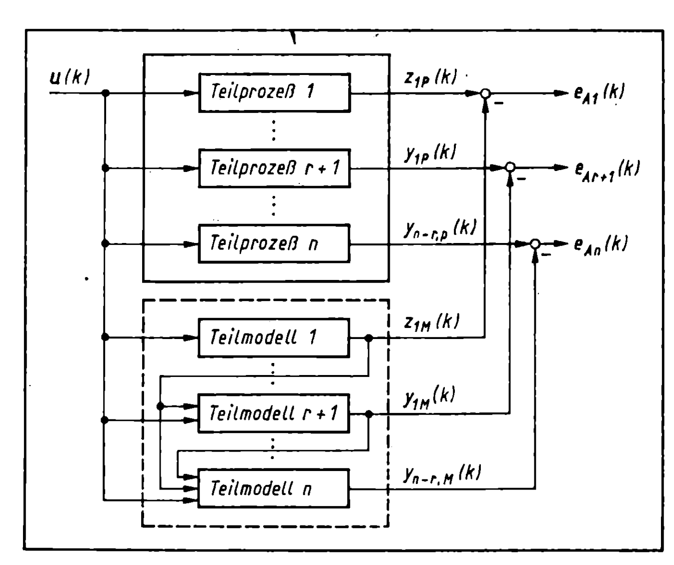


Bild 1. Schätzablauf

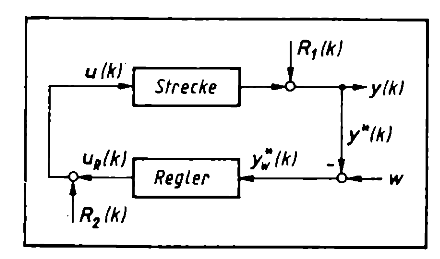


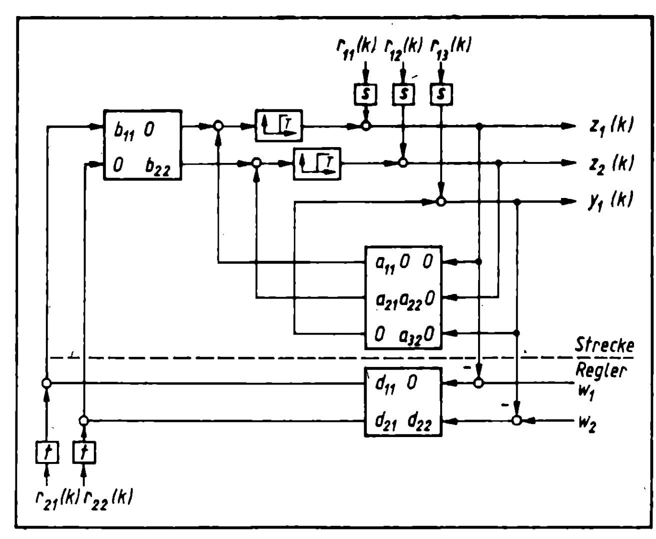
Bild 2. Modell des geschlossenen Mehrgrößenregelkreises mit Störsignalvektor $R_1(k)$ und zusätzlichem Testsignalvektor $R_2(k)$

nichtmeßbaren Modellgrößen $z_{M1}(k-1)$ bis $y_{Mn-r}(k-1)$ enthalten. Die Berechnung dieser Modellsignale bereitet keine Probleme, da sie lediglich für zurückliegende Tastzeitaugenblicke benötigt werden. Im Startvorgang sind sie unter Nutzung von Ergebnissen der theoretischen Prozeßanalyse zu berechnen.
Bild 1 soll den Schätzablauf unter dem Aspekt der Strukturdarstellung verdeutlichen. Die für den Gleichungsfehler angegebene Beziehung (3) kann sowohl zur Parameterschätzung mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate als auch der Hilfsvariablen genutzt werden.

2. Schätzung im geschlossenen Regelkreis

In den bisherigen Ausführungen wurde vorausgesetzt, daß keine Rückführung der Prozeßausgänge auf die Eingänge besteht. Es muß aber vielfach davon ausgegangen werden, daß bei einer Identifikation am realen Prozeß die bestehenden Rückführungen durch die Regler aus Gründen der Betriebssicherheit oder des Prozeßablaufes nicht beseitigt werden können. In einigen Systemen (z. B. biologischen oder ökonomischen) ist es darüber hinaus unmöglich, die innewohnenden Rückführungen zu unterbrechen.

Bild 3. Signalflußplan des simulierten Regelkreises



Von den beiden bekannten Möglichkeiten der Identifikation im geschlossenen System, der indirekten bzw. direkten Methode, wird hier auf die direkte Identifikation orientiert. Zur Sicherung der Identifizierbarkeit mit Hilfe der direkten Methode sollten nach [4] entweder

— ein zusätzliches Testsignal am Reglerausgang aufgeschaltet werden
— zwischen verschiedenen Reglereinstellungen variiert werden

oder

— bestimmte Verhältnisse der Ordnung von Modell und Regler berücksichtigt werden.

Wegen der relativ problemlosen Realisierbarkeit eines zusätzlichen Testsignalvektors in Form von binären Pseudorauschsignalen wird diese Methode vorgeschlagen. Unter Kenntnis der Parameter des als m-kanalig angenommenen Reglers kann dann der Kreis im Bild 2 vereinfacht dargestellt werden.
Da in der betrieblichen Praxis davon ausgegangen werden kann, daß nicht alle Ausgänge und Zustände des multivariablen Prozesses geregelt werden, ist $\boldsymbol{y}^*(k)$ der um die nicht geregelten Größen reduzierte Vektor $\boldsymbol{y}(k)$, wobei $\boldsymbol{y}^*(k)$ die Dimension $[1, m]$ hat. Aus den schon genannten Gründen der verbesserten Konsistenz bei größeren Störeinflüssen wird zur Parameterschätzung die Hilfsvariablenmethode (HV-Methode) herangezogen. Hierbei werden nicht nur geeignete Ersatzgrößen für die Prozeßausgänge und -zustände im Hilfsvariablenvektor benötigt, sondern es müssen auch die mit dem Gleichungsfehler korrelierten Eingangssignale $\boldsymbol{u}(k)$ ersetzt werden. Dazu ist es zweckmäßig, den von den anderen Prozeßsignalen unabhängigen Testsignalvektor $\boldsymbol{R}_2(k)$ als Teil im Hilfsvariablenvektor zu verwenden. Damit erhält man folgenden Aufbau des Hilfsvariablenvektors:

$$\boldsymbol{W}^T(k) = [y_{H1}(k-1) \dots y_{Hn}(k-1)\, r_{21}(k-1) \dots \\ \dots r_{2m}(k-1)]\,. \qquad (6)$$

Zur Schätzung sind weiterhin die Meßwertvektoren $\boldsymbol{m}_i^T(k)$ und Parametervektoren $\hat{\boldsymbol{p}}_i(k-1)$ bereitzustellen. Für das System nach (2) ergibt sich damit ein Vektoraufbau analog zu (4) und (5). Für die HV-Methode mit Tiefpaßfilter kann damit folgender Rekursivalgorithmus nach [4] bis [6] angegeben werden:

— Berechnung des Hilfsmodellparametervektors

$$\hat{\boldsymbol{p}}_{Hi}(k) = (1-\gamma)\,\hat{\boldsymbol{p}}_{Hi}(k-1) + \gamma\hat{\boldsymbol{p}}_i(k-1) \qquad (7)$$

— Berechnen des Hilfsmodellausganges

$$y_{Hi}(k) = \boldsymbol{W}_i^T(k)\,\hat{\boldsymbol{p}}_{Hi}(k) \qquad (8)$$

— Bestimmen des neuen Hilfsmodellvektors

$$\boldsymbol{W}_i^T(k-1) = [y_{H1}(k) \dots y_{Hn}(k)\, r_{2,1}(k) \dots r_{2,m}(k)] \qquad (9)$$

— Berechnung des Korrekturvektors

$$\boldsymbol{q}_i(k) = \frac{\boldsymbol{P}_i(k-1)\,\boldsymbol{W}_i(k)}{1 + \boldsymbol{m}_i^T(k)\,\boldsymbol{P}_i(k-1)\,\boldsymbol{W}_i(k)} \qquad (10)$$

— Berechnung der Präzisionsmatrix

$$\boldsymbol{P}_i(k) = \boldsymbol{P}_i(k-1) - \boldsymbol{q}_i(k)\,\boldsymbol{m}_i^T(k)\,\boldsymbol{P}_i(k-1) \qquad (11)$$

— Berechnung des Gleichungsfehlers analog zu (3).

Damit erhält man für den Parametervektor

$$\hat{\boldsymbol{p}}_i(k) = \hat{\boldsymbol{p}}_i(k-1) + \boldsymbol{q}_i(k)\, e_{Gi}(k)\,. \qquad (12)$$

Der hier angegebene Algorithmus unterscheidet sich nur durch die andere Konditionierung des Hilfsvariablenvektors $\boldsymbol{W}_i(k)$; d. h. ein Ersetzen der Eingangsgrößen $\boldsymbol{u}(k)$ durch den zusätzlichen Testsignalvektor $\boldsymbol{R}_2(k)$ gegenüber einer Schätzung im offenen System. Damit gelingt es auch im geschlossenen Regelkreis, das multivariable Schätzproblem auf die Schätzung von n Einzelsystemen zurückzuführen. Die Dimensionierung des Reglers hat hierbei keinen Einfluß auf den Ablauf der Schätzung.

3. Demonstrationsbeispiel

3.1. *Festlegungen zum Prozeß*

Als Demonstrationsbeispiel wird ein Prozeß mit 2 Eingängen und 3 Ausgängen herangezogen. Den deterministischen Prozeß-

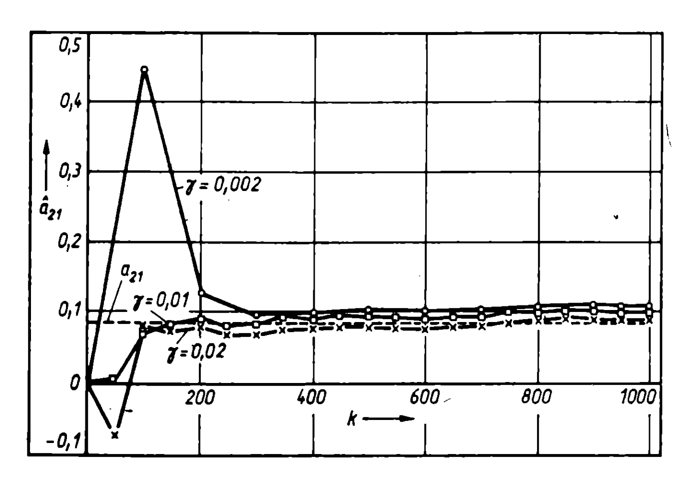


Bild 4. Verlauf von a_{21} bei verschiedenen Werten der Filterkonstante γ

anteil stellt ein Differenzengleichungssystem zweiter Ordnung mit einer zusätzlichen statischen Ausgangsgleichung dar. Der diesem deterministischen Anteil überlagerte stochastische Anteil wurde durch die Momentanwerte $r_{11}(k)$, $r_{12}(k)$ und $r_{13}(k)$ eines Zufallsgenerators erzeugt, der normalverteilte mittelwertfreie Störsignale liefert. Die Struktur des Prozesses und die Startparameter wurden durch eine zuvor durchgeführte theoretische Analyse gewonnen. Als Regler wurde ein zweikanaliger P-Regler gewählt, der nicht optimal dimensioniert wurde. Bild 3 zeigt den Signalflußplan des simulierten Regelkreises. Hierbei sind s und t Wichtungsfaktoren der Stör- bzw. Testsignale; d_{21} stellt einen Kopplungsfaktor des Reglers dar, der zwischen Null und $0{,}1 \cdot d_{22}$ variiert werden konnte.

Vor dem Start der rekursiven Schätzung müssen festgelegt werden:

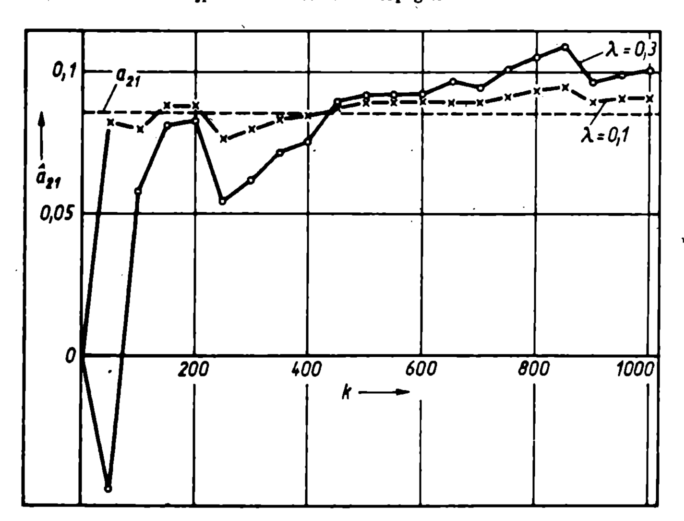
- Parametervektoren $\hat{\boldsymbol{p}}_i(0)$
- Präzisionsmatrizen $\boldsymbol{P}_i(0) = \alpha \boldsymbol{I}$.
- Verstärkungsfaktoren des Reglers
- Filterkonstante γ des Tiefpasses
- Zahl der Abtastungen je kleinster PRBS-Periode.

3.2. *Ergebnisse der Schätzung*

Mit willkürlich gewählten Werten für die festzulegenden Größen waren nur im ungestörten Fall ($s = 0$) konstante Schätzungen erreichbar.

Gute Ergebnisse wurden bis zu einem Störpegel von $\lambda = 20\%$ (nach [3]), Werten der Filterkonstante von $\gamma = 0{,}01 \dots 0{,}1$ und Parametrierung der Präzisionsmatrix mit $\alpha = 10^4$ erreicht. In der durchgeführten Versuchsreihe zeigte sich, daß der Koppelfaktor d_{21} in dem einstellbaren Bereich kaum Auswirkungen auf die Güte der Schätzergebnisse hatte. Die Bilder 4 bis 6 demonstrieren repräsentative Schätzergebnisse. Größere Fehler traten nur bei den Parametern auf, die die Kopplungen zu vorgeschalteten Teilsystemen herstellen (Parameter a_{21} und a_{32}). Eine Variation der Abtastrate des pseudostochastischen Binärsignales zeigte ein schwaches Optimum bei drei Abtastungen je kleinster Impulsbreite des Signales. Eine häufigere Abtastung brachte aufgrund der zu geringen Signaländerungen divergentes Verhalten der Schätzung. Eine geringere Abtastrate führte zu einer Zunahme des systematischen Fehlers der Schätzung (Informationsverlust durch verändertes Amplitudenspektrum des Signales). Ein Start des Schätzalgorithmus mit von Null verschiedenen Parametervektoren brachte nur bei zu klein gewählten Werten ($\leqq 70\,\%$ der wahren Parameter) deutlich erkennbare Verbesserungen, bei sehr großen Werten ($> 150\,\%$ der wahren Parameter) trat Divergenz der Schätzung ein. Das zeigt, daß die Festlegung der Startwerte für die Schätzung relativ unkritisch ist; es müssen somit keine genauen aufwendigen Berechnungen mit Hilfe der theoretischen Analyse ausgeführt werden. Der Einfluß stark fehlerbehafteter Strukturinformationen auf die Schätzergebnisse wurde noch nicht untersucht.

Bild 5. Verlauf von a_{21} bei verschiedenen Störpegeln



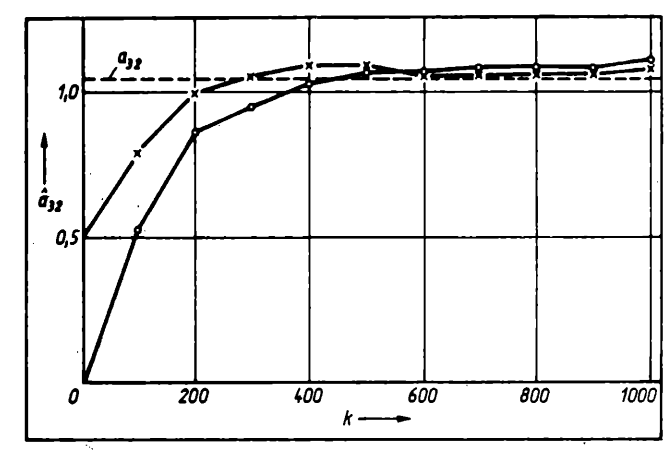


Bild 6. Verlauf von a_{32} bei unterschiedlichen Startwerten $a_{32}(0)$, $\lambda = 0{,}1$

Zusammenfassung

Es wurde ein Verfahren zur Parameterschätzung multivariabler Systeme vorgestellt, das mit der angegebenen Modifizierung der speziellen Vektoren auch im geschlossenen System angewendet werden kann. Dabei wird auf bekannte Schätzverfahren zurückgegriffen, die sich im Eingrößenfall bewährt haben. Spezielle Kombinationen, z. B. Start mit der MKQ und Umschalten auf HV oder Rücksetzen der Präzisionsmatrix, können genutzt werden. Durch die gewählte Strukturdarstellung gelingt es, das multivariable Schätzproblem auf den Eingrößenfall zurückzuführen. Damit werden gegenüber anderen Verfahren Vorteile bezüglich Rechnerbelastung und Programmierung erreicht. Die Anwendung des beschriebenen Verfahrens liefert sowohl im offenen als auch im geschlossenen System ein vollständiges Zustandsmodell. Dies ist aber zunächst an die Forderung der vollständigen Meßbarkeit des Zustandsvektors gebunden.

Literatur

[1] *Döschner, Ch.:* Mathematische Modellbildung für kontinuierliche, technologische Prozesse durch theoretische Prozeßanalyse. Dissertation B, TH „Otto von Guericke" Magdeburg 1975.
[2] *Döschner, Ch.; Knorr, J.:* Ein Konzept der Parameterschätzung multivariabler Systeme unter Nutzung von Ergebnissen der theoretischen Prozeßanalyse. Wissenschaftliche Berichte der TH Leipzig 4/1986.
[3] *Döschner, Ch.; Knorr, J.:* Parameterschätzung für multivariable Systeme unter Einbeziehung von a-priori-Informationen aus der theoretischen Prozeßanalyse. Wissensch.-techn. Zeitschrift der TH Magdeburg 30 (1986) 8, S. 85–89.
[4] *Bauer, B.:* Parameterschätzverfahren zur on-line Identifikation dynamischer Systeme im offenen und geschlossenen Regelkreis. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum 1977.
[5] *Young, P. C.:* An instrumental variable method for real-time identification of a noisy process. Automatica 6 (1970), S. 271–287.
[6] *Müller, S.:* Rekursive Parameteridentifikation unter Verwendung von Hilfsvariablen. Dissertation A, TH Magdeburg 1984.

msr 8682

G. Billerbeck; L. Klinsmann

Mikrorechner-Implementierung von MKQ-Algorithmen zur Parameterschätzung in adaptiven Systemen

0. Einleitung

Die rekursive Methode der kleinsten Quadrate (MKQ) ist ein robustes Parameterschätzverfahren mit relativ geringem Rechenaufwand. Trotz einschränkender Bedingungen für eine erwartungstreue Parameterschätzung findet sie breite Anwendung in adaptiven (self-tuning) Regelungssystemen (Bild 1), deren Gesamtfunktion sich aus dem Zusammenwirken einer inneren Schleife (Grundregelkreis) mit einer äußeren, überlagerten Adaptionsschleife ergibt. Der Wirkungsablauf in der äußeren Schleife erfordert neben der Parameterschätzung die On-line-Lösung des zugrunde liegenden Entwurfsproblems. Im Hinblick auf einen geringen Rechenaufwand sind insbesondere entwurfsarme Regler, wie Deadbeat-Regler und Minimal-Varianz-Regler, mit MKQ-Schätzalgorithmen kombiniert worden. Darüber hinaus können durch eine geeignete Reparametrisierung des Prozeßmodells die Reglerparameter direkt geschätzt werden, so daß deren gesonderte Berechnung entfällt.

Adaptive Regelungssysteme lassen sich kostengünstig mit Mikrorechnern (MR) realisieren. Bei diesen steht für die Abarbeitung der numerischen Operationen i. allg. nur eine Softwaregleitkommaarithmetik kurzer Wortlänge zur Verfügung (z. B. 2-byte-Mantisse, 1-byte-Exponent).

Die direkte rechentechnische Umsetzung des MKQ-Algorithmus auf der Basis einer Kurzwortarithmetik ist numerisch instabil, so daß der unmittelbare Einsatz dieser Variante in industriell genutzten Regelungssystemen aus Gründen der Funktionssicherheit ausscheidet. Folglich müssen besondere Maßnahmen — oft heuristischer Natur — ergriffen werden, um die numerische Stabilität und damit die Funktion des adaptiven Systems im Dauerbetrieb zu gewährleisten.

Dieser Sachverhalt wird anhand von Simulationsuntersuchungen dargestellt und zeigt Alternativlösungen, die numerisch stabil arbeiten.

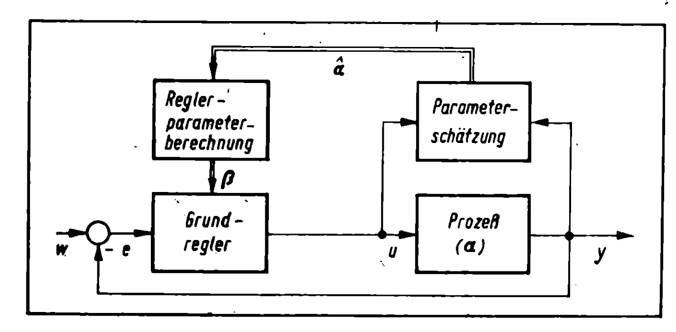


Bild 1. Schematischer Aufbau eines Self-Tuning-Regelungssystems

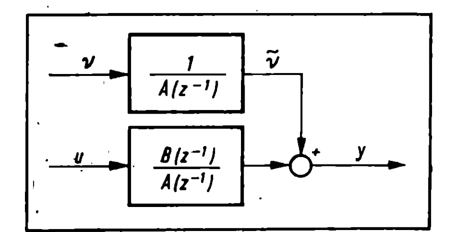


Bild 2. Prozeß- und Störsignalmodell

1. Rekursive Methode der kleinsten Quadrate (MKQ)

Ausgehend von dem Modellansatz im Bild 2 lauten die Rekursionsgleichungen [1]:

$$\text{Parametervektor} \quad \hat{\alpha}_k = \hat{\alpha}_{k-1} + h_k \varepsilon_k , \tag{1}$$

$$\text{Gleichungsfehler} \quad \varepsilon_k = y_k - \hat{\alpha}_{k-1}^T x_k , \tag{2}$$

$$\text{Meßvektor} \quad x_n^T = (y_{k-1} \dots y_{k-n} u_{k-1} \dots u_{k-n}) , \tag{3}$$

$$\text{Korrekturvektor} \quad h_k = \frac{Q_{k-1} x_k}{\lambda + x_k^T Q_{k-1} x_k} , \tag{4}$$

$$\text{Wichtungsmatrix} \quad Q_k = \lambda^{-1} (I - h_k x_k^T) \, Q_{k-1} \tag{5}$$

mit Q_0 symmetrisch, positiv definit und $0 < \lambda \leq 1$.

Die Stabilität des Gleichungssystems (1) bis (5) ist gesichert, wenn Q_k für alle $k = 1, 2, \dots$ symmetrisch und positiv (semi-)definit ist. Infolge der begrenzten Rechengenauigkeit wird Q_k insbesondere bei schlechter Konditionierung mit wachsendem k indefinit, so daß Instabilität auftritt. Die Verwendung einer Arithmetik höherer Genauigkeit schiebt den Zeitpunkt der „Zerstörung" hinaus, schafft jedoch i. allg. keine grundsätzliche Abhilfe.

Der MKQ-Algorithmus würde unter Verwendung einer 3-byte-Arithmetik auf einem 8-bit-Mikrorechner (CPU U880) implementiert. Das Programm greift auf eine Unterprogrammbibliothek für Vektor- und Matrizenoperationen zu.

Als Beispiel sei ein Prozeß 2. Ordnung mit der diskreten Übertragungsfunktion

$$G(z) = \frac{0{,}03z^{-1} + 0{,}02z^{-2}}{1 - 1{,}6z^{-1} + 0{,}64z^{-2}} , \tag{6}$$

$$\alpha^T = (1{,}6 \quad -0{,}64 \quad 0{,}03 \quad 0{,}02)$$

angeführt. Zur besseren Darstellung der numerischen Effekte wurde das Prozeßmodell digital und störungsfrei simuliert. Die Parameterschätzung startet mit den Werten

$$\hat{\alpha}_0 = 0 , \quad \lambda = 1 , \quad Q_0 = 6{,}4 \cdot 10^4 \cdot I .$$

Ein Zufallsgenerator mit nachgeschaltetem Tiefpaßfilter liefert das Prozeßeingangssignal u (Mittelwert Null). Die Bilder 3a bis 3d zeigen die Verläufe der 4 Parameter $\hat{\alpha}_k$. Nach 30 Schritten ergeben sich die Schätzwerte

$$\hat{\alpha}_{30}^T = (0{,}1600 \cdot 10^1 \quad -0{,}6395 \cdot 10^0 \quad 0{,}2996 \cdot 10^{-1} \quad 0{,}201 \cdot 10^{-1})$$

d. h., sie stimmen praktisch mit den wahren Werten α überein. Dieses gute Schätzergebnis wird beibehalten, bis nach 236 Schritten die Wichtungsmatrix Q indefinit wird ($q_{11} < 0$);

$$Q_{236} = \begin{pmatrix} -0{,}4498 & . & . & . \\ 0{,}1887 & 0{,}0434 & . & . \\ 0{,}5696 & -0{,}5094 & 0{,}2170 & . \\ -0{,}8570 & 0{,}7690 & -0{,}2788 & 0{,}4248 \end{pmatrix} \cdot 10^{-1} .$$

Es tritt Instabilität ein, der Parametervektor $\hat{\alpha}_k$ und die Matrix Q_k durchlaufen große Zahlenbereiche (die Amplituden der Parameter $\hat{\alpha}_k$ sind in der zeichnerischen Darstellung (Bild 3) begrenzt).

Das Einsetzen der numerischen Instabilität hängt vom konkreten Beispiel, von den Signalen und von der Startmatrix Q_0 ab. Ersichtlich ist, daß diese Algorithmenvariante der MKQ-Schätzung in adaptiven Systemen mit laufender Identifikation nicht einsetzbar ist [1].

Dr.-Ing. *Gerhard Billerbeck* (42) studierte von 1965 bis 1970 Hochfrequenztechnik an der TU Dresden. Von 1970 bis 1972 Forschungsingenieur für Prozeßautomatisierung im Stahl- und Walzwerk Brandenburg, seit 1972 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Zentralinstitut für Kybernetik und Informationsprozesse, Institutsteil Dresden, der AdW der DDR. 1977 Promotion A (Regelungstechnik).

Dr.-Ing. *Lutz Klinsmann* (46) studierte von 1960 bis 1966 Regelungstechnik an der TU Dresden. Seit 1966 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Zentralinstitut für Kybernetik und Informationsprozesse, Institutsteil Dresden, der AdW der DDR. 1976 Promotion A (Regelungstechnik).

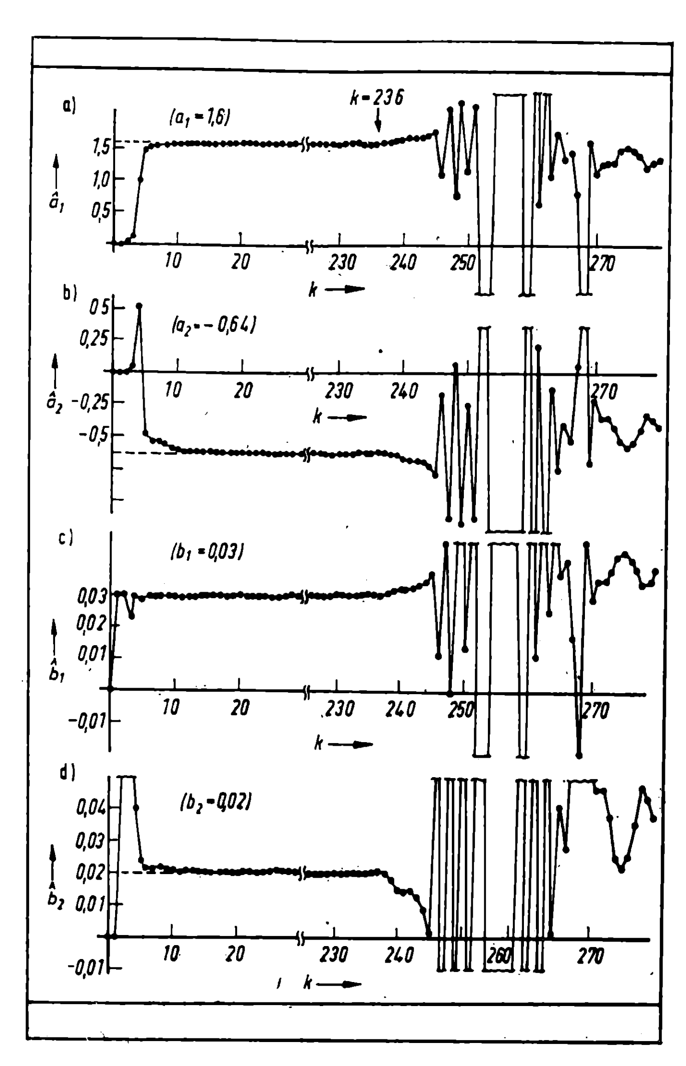


Bild 3. Parameterverläufe der Standard-MKQ

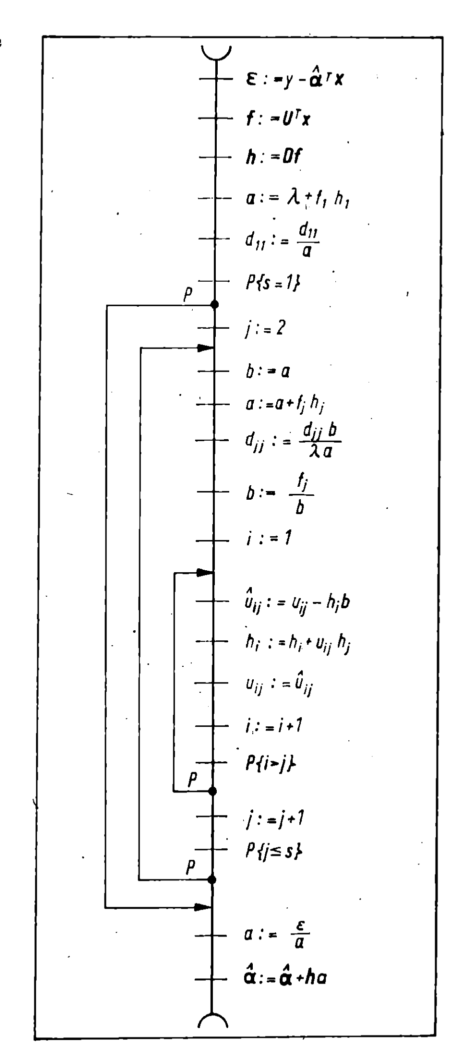


Bild 4. Programmablaufplan des UD-Faktor-Algorithmus

d_{ij} Element von $\boldsymbol{D}$; h_j Element von $\boldsymbol{h}$; f_j Element von $\boldsymbol{f}$; u_{ij} Element von $\boldsymbol{U}$

2. Schätzalgorithmen auf der Basis von Faktorisierungsmethoden

Faktorisierungsmethoden machen sich die Tatsache zunutze, daß jede symmetrische, positiv definite Matrix $\boldsymbol{Q}$ vom Range s als Matrizenprodukt

$$\boldsymbol{Q} = \boldsymbol{P}\boldsymbol{P}^T \tag{7a}$$

bzw.

$$\boldsymbol{Q} = \boldsymbol{U}\boldsymbol{D}\boldsymbol{U}^T \tag{7b}$$

dargestellt werden kann, worin $\boldsymbol{P}$ bzw. $\boldsymbol{U}$ reelle Matrizen vom Rang s sind; $\boldsymbol{D}$ ist symmetrisch, positiv definit entsprechender Dimension mit dem Rang $s_1 \geqq s$ [2].

Die Grundidee der modifizierten Schätzalgorithmen besteht darin, anstelle der Wichtungsmatrix $\boldsymbol{Q}$ (siehe (5)) nur deren Matrixfaktoren $\boldsymbol{P}$ bzw. $\boldsymbol{U}$ und $\boldsymbol{D}$ rekursiv zu berechnen. Daraus folgt, daß $\boldsymbol{Q}$ die geforderten Definitheitseigenschaften beibehält, wobei $\boldsymbol{Q}$ selbst nicht explizit berechnet werden muß. Die Faktorisierung nach (7a) führt auf die sogenannten Quadratwurzelfilter, die insbesondere bei Kalman-Filtern Anwendung finden. Die Matrix $\boldsymbol{P}$ ist darin eine obere Dreiecksmatrix, die als „Quadratwurzel" von $\boldsymbol{Q}$ bezeichnet wird. Typisches Merkmal der Algorithmen ist die Ausführung von Quadratwurzeloperationen entsprechend der Dimension von $\boldsymbol{P}$ (siehe [3]). Die Faktorisierung nach (7b) umgeht Wurzeloperationen durch Einführung des Matrixfaktors $\boldsymbol{D}$. $\boldsymbol{U}$ ist wiederum eine obere Dreiecksmatrix mit Diagonalelementen $u_{ii} = 1$; $\boldsymbol{D}$ ist eine positiv (semi-)definite Diagonalmatrix (siehe [4]).

Stellvertretend für diese Verfahren sei nachfolgend die UD-Faktorisierung näher umrissen. Eine ausführliche Darstellung von Faktorisierungsmethoden mit Angabe entsprechender FORTRAN-Routinen ist in [5] zu finden.

Mit den Festlegungen

$$\boldsymbol{Q}_{k-1} = \boldsymbol{U}\boldsymbol{D}\boldsymbol{U}^T, \qquad \boldsymbol{Q}_k = \hat{\boldsymbol{U}}\hat{\boldsymbol{D}}\hat{\boldsymbol{U}}^T, \tag{8}$$

$$\boldsymbol{f} = \boldsymbol{U}^T \boldsymbol{x}_k, \tag{9}$$

$$\boldsymbol{h} = \boldsymbol{D}\boldsymbol{f} \tag{10}$$

geht die Rekursionsgleichung (5) in die Form

$$\lambda \hat{\boldsymbol{U}}\hat{\boldsymbol{D}}\hat{\boldsymbol{U}}^T = \boldsymbol{U}(\boldsymbol{D} + c\boldsymbol{h}\boldsymbol{h}^T)\,\boldsymbol{U}^T \tag{11}$$

über, mit

$$c = -(\lambda + \boldsymbol{f}^T\boldsymbol{h})^{-1}. \tag{12}$$

Der Matrixfaktor $(\boldsymbol{D} + c\boldsymbol{h}\boldsymbol{h}^T)$ in (11), der sich aus der Summe einer positiv definiten Matrix $\boldsymbol{D}$ und einem gewichteten dyadischen Produkt zusammensetzt, läßt sich explizit nach dem Verfahren von *Agee/Tuner* (siehe hierzu [5]) faktorisieren, so daß gilt

$$\boldsymbol{D} + c\boldsymbol{h}\boldsymbol{h}^T = \tilde{\boldsymbol{U}}\tilde{\boldsymbol{D}}\tilde{\boldsymbol{U}}^T \tag{13}$$

Die Matrizen $\tilde{\boldsymbol{U}}, \tilde{\boldsymbol{D}}$ sind vom gleichen Typ wie $\boldsymbol{U}, \boldsymbol{D}$ in (8). Die gesuchten Faktoren $\hat{\boldsymbol{U}}, \hat{\boldsymbol{D}}$ ergeben sich aus (11) und (13):

$$\hat{\boldsymbol{U}} = \boldsymbol{U}\tilde{\boldsymbol{U}}, \qquad \hat{\boldsymbol{D}} = \lambda^{-1}\tilde{\boldsymbol{D}}. \tag{14}$$

Die Matrix $\hat{\boldsymbol{U}}$ erfüllt die oben angegebenen Voraussetzungen, da das Produkt zweier oberer Dreiecksmatrizen, deren Diagonalelemente „Eins" sind, wiederum eine obere Dreiecksmatrix mit Elementen $\hat{u}_{ii} = 1$ ergibt.

Bild 4 zeigt den Programmablaufplan für den gesamten Parameterschätzalgorithmus mit UD-Faktorisierung, der im Hinblick auf die programmtechnische Umsetzung günstig aufbereitet wurde. Im Ergebnis jedes Rekursionsschrittes liegen die Matrixfaktoren $\hat{\boldsymbol{U}}, \hat{\boldsymbol{D}}$ sowie die s aktuellen Schätzparameter $\hat{\boldsymbol{\alpha}}$ vor. Ersichtlich ist, daß eine explizite Berechnung der Wichtungsmatrix $\boldsymbol{Q}_k$ nicht erforderlich ist.

Neben dem vorgestellten UD-Algorithmus ist der oben erwähnte Quadratwurzelfilter-Algorithmus auf dem MR implementiert worden. Wie bei der Standard-MKQ-Schätzung unter Ausnutzung der Symmetrieeigenschaften von $\boldsymbol{Q}$ nur $s(s+1)/2$ Ele-

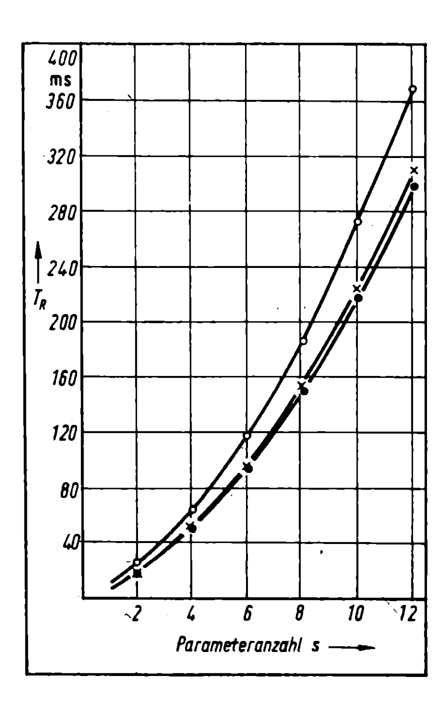


Bild 5. Rechenzeitvergleich der untersuchten Algorithmen
× Standard-MKQ,
○ Quadratwurzelfilter;
● UD-Faktor-Algorithmus

mente von Q rekursiv zu berechnen sind, so trifft dieser Sachverhalt auch auf die Berechnung von P bzw. U, D nach (7a) und (7b) zu (die Diagonalelemente von U bleiben unverändert und werden nicht abgespeichert).
Bei umfangreichen Testrechnungen auf der Basis der 3-byte-Arithmetik arbeiteten die Schätzalgorithmen mit UD- bzw. Quadratwurzelfaktorisierung numerisch stabil. Beide Verfahren wurden als Bestandteil von Self-Tuning-Regelungssystemen unter praxisnahen Bedingungen getestet. Während der durchgeführten Dauerversuche trat keine numerische Instabilität auf. In [5] wurde ausgewiesen, daß die erzielte Genauigkeit dieser Methoden annähernd so groß ist wie die der Standard-MKQ, die auf eine Arithmetik doppelter Genauigkeit zurückgreift.
Für das obengenannte Beispiel (6) lieferte der UD-Algorithmus nach 30 bzw. 10^6 Schritten die Schätzwerte

$$\hat{\alpha}_{30}^T = (0{,}1600 \cdot 10^1 \quad -0{,}6398 \cdot 10^0 \quad 0{,}3001 \cdot 10^{-1} \quad 0{,}2005 \cdot 10^{-1})\,,$$

$$\hat{\alpha}_{10^6}^T = (0{,}1600 \cdot 10^1 \quad -0{,}6399 \cdot 10^0 \quad 0{,}3000 \cdot 10^{-1} \quad 0{,}2001 \cdot 10^{-1})\,.$$

Auch bei Modellen höherer Ordnung (bis zu 16 Parametern) war die Stabilität der Algorithmen gesichert, wenn auch die Genauigkeit der Schätzergebnisse mit wachsender Parameteranzahl abnimmt.

3. Vergleich des rechentechnischen Aufwandes

Die 3 diskutierten Versionen der MKQ-Schätzung werden nachfolgend hinsichtlich Speicherplatzbedarf, numerischem Aufwand und Rechenzeit verglichen.

3.1. *Speicherplatzbedarf*

Die Softwaregleitkommaarithmetik sowie die Programme zur Meßwerterfassung und -aufbereitung bleiben bei der Aufstellung unberücksichtigt. Der PROM-Bedarf in byte (ohne Konstanten) geht aus nachfolgender Tabelle hervor:

	Standard-MKQ	QW-Filter	UD-Faktorisierung
Programm	195	539	449
UP-Bibliothek	506	532	436
Σ	701	1071	885

Der relativ geringe Programmaufwand der Standard-MKQ resultiert aus der Möglichkeit, den Algorithmus in kompakter Form nach (1) bis (5) abzuarbeiten.
Der RAM-Bedarf in byte für flüchtige Daten ist von der Parameteranzahl s abhängig und bis auf den konstanten Anteil für alle 3 Varianten gleich:

$$1{,}5\,s^2 + 13{,}5\,s + 6\;(+18;\;+12)\,.$$

3.2. *Numerischer Aufwand*

Die Anzahl der numerischen Operationen je Rekursionsschritt in Abhängigkeit von der Parameteranzahl s verteilt sich wie folgt:

	Standard-MKQ	QW-Filter	UD-Faktorisierung
+, −	$2\,s^2 + 2\,s$	$1{,}5\,s^2 + 1{,}5\,s$	$1{,}5\,s^2 + 1{,}5\,s$
*	$2\,s^2 + 5\,s + 1$	$2\,s^2 + 6\,s - 2$	$1{,}5\,s^2 + 4{,}5\,s - 2$
/	1	$2\,s$	$2\,s$
$\sqrt[2]{\ }$	–	s	–

3.3. *Rechenzeit je Rekursionsschritt*

Die Rechenzeit wächst wie der numerische Aufwand mit dem Quadrat der Parameteranzahl s. Bild 5 zeigt die experimentell ermittelten Rechenzeiten (in ms), wobei die Rechenzeit der Einzeloperationen, bezogen auf die Addition, folgende Verhältnisse aufweisen:

$$T_{\mathrm{MUL}} = 1{,}5\,T_{\mathrm{ADD}}\,, \qquad T_{\mathrm{DIV}} = 2{,}2\,T_{\mathrm{ADD}}\,,$$
$$T_{\sqrt{}} = 3{,}3\,T_{\mathrm{ADD}}\,.$$

Schlußfolgerung

Hinsichtlich numerischer Stabilität, Speicherplatz- und Rechenzeitbedarf ist die UD-Faktorisierung besonders für den Mikrorechnereinsatz zu empfehlen.

Literatur

[1] *Harris, C. J.; Billings, S. A.* (editors): Self-Tuning and Adaptive Control: Theory and Applications. IEE Control Engineering Series 15. Stevenage: P. Peregrinius Ltd. 1981.
[2] *Zurmühl, R.:* Matrizen. Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer-Verlag 1961.
[3] *Peterka, V.:* A Square Root Filter for Real Time Multivariate Regression. Kybernetika, 11 (1975) 1, pp. 53–67.
[4] *Bierman, G. J.:* Measurement Updating using the U-D Factorization. Automatica 12 (1976), pp. 375–382.
[5] *Bierman, G. J.:* Factorization Methods for Discrete Sequential Estimation. New York/San Francisco/London: Academic Press 1977.

msr 8690

W. Götze; J.-A. Müller

Analyse und Vorhersage des monatlichen Elektroenergieverbrauchs im VE Fischhandel Berlin

0. Einleitung

Der VE Fischhandel Berlin verfügt über etwa 50 Fischauslieferungslager (FAL). Der monatliche Elektroenergieverbrauch der FAL wird für das jeweilige Planjahr vom Bereich Technik des Betriebes vorausberechnet. Die Grundlage dafür bildeten bisher Expertenschätzungen der einzelnen FAL. Die Zuverlässigkeit dieser manuellen Vorhersagen ist sehr unterschiedlich und hängt wesentlich von der Erfahrung und Informiertheit der jeweiligen Bearbeiter ab. Fehler bei der Einschätzung des Elektroenergieverbrauches wirken sich für den Betrieb dahingehend aus, daß nicht ausgeschöpfte Monatskontingente verfallen und ein eventueller Mehrbedarf im Folgemonat gesondert beantragt werden muß.

Innerhalb der Bezirke bestehen Möglichkeiten zur Umverteilung nicht in Anspruch genommener Elektroenergiekontingente einzelner FAL. Diese Möglichkeiten sind aber dadurch eingeschränkt, daß die Kapazität der FAL sehr unterschiedlich ist. Treten Plan-Ist-Abweichungen in großen Objekten auf, bestehen nur noch geringe Chancen einer Umverteilung auf umliegende leistungsschwächere FAL. Die Bemühungen der Leitung zur Qualifizierung der Vorausberechnung des Elektroenergieverbrauchs konzentrieren sich deshalb auf etwa 15 Großobjekte, die gleichmäßig auf die Bezirke der Republik verteilt sind. Die Untersuchungsaufgabe bestand nun darin, auf der Grundlage der Vorhersageabweichungen in den Vergleichsjahren 1984 und 1985 für ausgewählte FAL geeignete Verfahren zur rechnergestützten Vorhersage zu bestimmen.

1. Systemanalyse

Die wesentlichen Einflußfaktoren für den Verbrauch von Elektroenergie in einem FAL bestehen in

- der Bereitstellung von Kühlgut durch den Fischfang
- der Kerntemperatur des einzulagernden Kühlgutes
- der Umgebungstemperatur des Kühlhauses
- den technischen Parametern der Kühlaggregate.

Die Kühlgutbereitstellung ist von den Fangergebnissen der Fischereiflotte abhängig. Der Hochseefischfang konzentriert sich traditionell auf das Winterhalbjahr, so daß der Einlagerungshöhepunkt am Ende des 1. Quartals liegt.

Die Kerntemperatur des eingelagerten Kühlgutes soll nach TGL −18 °C betragen. Das ist bei der Übernahme von Frostfisch aus den Kühlwagen nicht immer der Fall. In Abhängigkeit von der Transportentfernung zwischen den Häfen und den FAL, den klimatischen Verhältnissen während des Transportes und organisatorisch bedingten Standzeiten auf dem Eisenbahnstrekkennetz kann sich das Kühlgut bis auf wenige Grad unter Null erwärmen. Bei der Einlagerung muß in derartigen Fällen schockgefrostet werden, was mit erheblichem Mehraufwand an Energie verbunden ist.

Die Umgebungstemperatur wirkt sich im Rahmen des jahreszeitlichen Klimazyklus ebenfalls auf den Elektroenergieverbrauch aus. Der Energiebedarf ist im Sommer höher als im Winter. Allein die Öffnungsdauer der Kühlzelle zur Entnahme oder Einlagerung von Fischwaren ist für den Energiehaushalt von großer Bedeutung.

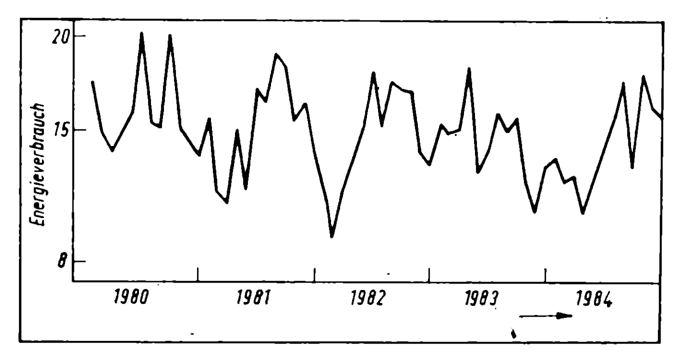


Bild 1. Elektroenergieverbrauch eines Kühlhauses in MWh

Für die Modellierung stellte der VE Fischhandel Berlin Zeitreihen des monatlichen Elektroenergieverbrauchs in kWh für 10 FAL zur Verfügung. Das Datenmaterial mußte auf Vergleichbarkeit geprüft werden. In einigen Fällen ließ sich eine Reduktion des verfügbaren Beobachtungszeitraumes von 10 Jahren (1976 bis 1985, 120 Werte) auf 8 Jahre nicht vermeiden. Ursache dafür waren rekonstruktionsbedingte Strukturbrüche in den Zeitreihen. Ferner mußten etwa 2% der Daten korrigiert werden. Bild 1 zeigt den Verlauf des Elektroenergieverbrauchs eines Kühlhauses. Aus der Darstellung ist bereits erkennbar, daß neben Saisonschwankungen, die durch den Temperaturverlauf bedingt sind, weitere starke Einflußgrößen einwirken, über die jedoch keine Information vorliegt. Diese Einflußgrößen mußten deshalb als stochastische Einflußgrößen angenommen werden. Als einzige meßbare Einflußgröße konnte die Monatsdurchschnittstemperatur in den jeweiligen Territorien anhand der monatlichen Witterungsberichte des klimatologischen Hauptamtes Potsdam erfaßt werden (Bild 2).

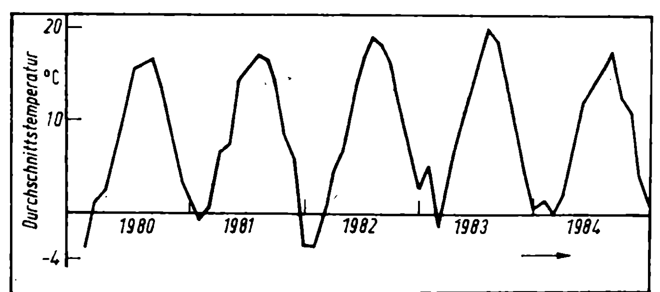
Diese vorliegende A-priori-Unbestimmtheit in der Wahl der Modellstruktur (Einflußgrößen und funktionelle Beziehungen) und in der Kenntnis der Störgrößen (eigentliche Störgrößen und nicht meßbare Einflußgrößen) beeinflußt die Modellbildung und insbesondere die Parameterschätzung erheblich. Zur Anwendung kamen deshalb zwei weitgehend alternative Herangehensweisen:

- Anwendung des Dialogs zur Berücksichtigung der beim Anwender vorhandenen A-priori-Information (Abschn. 2.)
- rechnergestützte Auswahl eines Modells (Abschn. 3.).

2. Anwendung des Dialogs zur Berücksichtigung der beim Anwender vorhandenen A-priori-Information

Ein führendes Modellauswahlverfahren zur Analyse und Vorhersage kurzfristiger Prozesse ist die ARIMA-Methodik nach *Box/Jenkins* (siehe z. B. [1]). Einer ihrer wichtigsten Vorzüge besteht darin, daß das Konzept sowohl univariate als auch bivariate Ansätze zuläßt. Man kann demzufolge die Gesetzmäßigkeiten eines Prozesses allein aus der Vergangenheitsentwicklung erklären (univariat) oder darüber hinaus noch einen geeigneten Einflußfaktor bei der Modellierung hinzuziehen (bivariat). Eine erfolgreiche Anwendung dieser Methode erfordert eine gründliche

Bild 2. Monatsdurchschnittstemperatur (Meßstelle Seehausen bei Stendal)



Dr. oec. *Wolfgang Götze* (38) studierte von 1966 bis 1971 Mathematik an der Humboldt-Universität zu Berlin. Von 1971 bis 1974 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Ingenieurhochschule für Landtechnik Berlin-Wartenberg. Von 1974 bis 1986 im Zentralinstitut des Ministeriums für Bezirksgeleitete und Lebensmittelindustrie tätig. 1979 bis 1981 postgraduales Studium der Sozialistischen Betriebswirtschaft an der TU Dresden. 1985 Dissertation A zur angewandten Zeitreihenanalyse und Vorhersage an der Hochschule für Ökonomie „Bruno Leuschner" Berlin. Seit 1986 dort wissenschaftlicher Assistent.

Prof. Dr. sc. oec. Dr.-Ing. *Johann-Adolf Müller* (46) studierte von 1959 bis 1965 an der TH Ilmenau Regelungstechnik. 1965 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Energetik. Von 1965 bis 1968 Aspirant am Moskauer Energetischen Institut am Lehrstuhl Avtomatika i telemechanika. 1968 Kandidat der technischen Wissenschaften (Dr.-Ing.). Seit 1968 an der Hochschule für Ökonomie „Bruno Leuschner", jetzt Sektion Wirtschaftsinformatik. 1971 Berufung als Hochschuldozent. 1978 Promotion B auf dem Gebiet der dynamischen Modellbildung in der Ökonomie. 1985 Berufung zum außerordentlichen Professor. Leiter des Wissenschaftsbereichs Systemforschung.

Tafel 1. Entscheidungen einer dialogorientierten ARIMA-Modellierung

Stufe	zu verarbeitende Informationen	zu treffende Entscheidungen
1	. Kenntnisse über den Prozeß . Zeitreihe	. ARIMA-Technik anwendbar . univariater oder bivariater Ansatz
2	. Kennfunktionen der Zeitreihe (TG, AKF, PAKF, IAKF, SDF) . Kenntnisse über den Verlauf der theoretischen Kennfunktionen	. Transformation . Trendfilterstruktur . Saisonfilterstruktur . multiplikativer Ansatz . Ordnung der Modellbestandteile . Varianten
3	. Kenntnisse über die Schätz- und Prüfverfahren . Kennfunktionen der geschätzten Residuen . Kenntnisse über den Verlauf der theoretischen Kennfunktionen der Residuen . Kenntnisse über den Verlauf der theoretischen Kennfunktionen eines ARMA-Prozesses	. Steuergrößen der Schätzung . Modell optimaler Kompliziertheit . Modell zulässig . Modell zur Vorhersage geeignet
4	. Kenntnisse über Fehlerkriterien und ihre Wichtung . Kenntnisse über den Vorhersagealgorithmus . Kenntnisse über manuelle Vorhersagen	. Steuergrößen Vorhersage . Auswahl Bestmodell

Tafel 2. Vorhersagegenauigkeit ARIMA-Modelle

FAL	univariat		bivariat	
	MAD_{84}[%]	MAD_{85}[%]	MAD_{84}[%]	MAD_{85} [%]
1	6,9	15,6	13,1	16,8
2	8,3	12,9	11,1	15,8
3	19,5	60,9	16,6	8,5
4	10,4	—	8,6	—
5	18,3	18,2	11,3	13,8
6	15,7	53,0	4,2	13,0
7	18,4	16,4	17,6	21,5
8	14,7	14,5	19,7	10,8
9	24,6	—	20,5	—
10	12,3	25,6	14,8	18,4
ø	16,5	27,1	14,4	14,8

Prozeßanalyse, die bei dem angewendeten Programmpaket (siehe [2]) weitgehend dialoggestützt erfolgt.
Tafel 1 enthält die erforderlichen Kenntnisse des Anwenders und die zu treffenden Entscheidungen bei der dialogorientierten ARIMA-Modellierung. Im vorliegenden Fall wurde die univariate Variante der ARIMA-Methodik auf alle Zeitreihen angewendet. Das methodische Vorgehen bestand darin,

- eine Aufspaltung des gesamten Beobachtungszeitraums in den Analysezeitraum (Entwicklung bis zum Jahre 1983) und den Ex-post-Prognosezeitraum (Entwicklung in den Jahren 1984 und 1985) vorzunehmen,
- ein Ensemble parametersparsamer adäquater Modelle vom Typ ARIMA im Analysebereich zu spezifizieren
- mittels eines Vergleichs von Vorhersagefehlern und Plan-Ist-Abweichungen im Ex-post-Prognosezeitraum zur Bestimmung des Bestmodells zu gelangen.

Die Analyse der Zeitreihen wurde anschließend mit der bivariaten Variante der ARIMA-Methodik fortgesetzt. Die einzelnen Arbeitsstufen umfassen wie bei der univariaten Variante die Modellvorauswahl, die Modellschätzung und -überprüfung sowie den Ex-post-Prognosevergleich und die Vorausberechnung für die Planung. Die erreichten Vorhersageergebnisse enthält Tafel 2. Dabei wurde die Bewertung nach dem relativen mittleren absoluten Fehler im Jahre 1984 bzw. 1985 vorgenommen (i = 84, 85):

$$MAD_i = \frac{\sum_{t \in K_i} |x_t^M - x_t|}{\sum_{t \in K_i} |x_t|} 100\,\%,$$

K_{84} bzw. K_{85} Monate der Jahre 1984 bzw. 1985.

Aufgrund durchgeführter Rekonstruktionsmaßnahmen wurden die Vorhersagen für das 4. und 9. FAL im Jahre 1985 nicht angeführt.

3. Rechnergestützte Auswahl eines Modells

Die im Abschn. 2. dargestellte Anwendung der ARIMA-Technik erfordert beim Anwender neben der Prozeßkenntnis auch gewisse mathematisch-statistische Kenntnisse, die Voraussetzung für eine erfolgreiche Anwendung der ARIMA-Technik sind (s. Tafel 1). Eine andere Möglichkeit bietet der rechnergestützte Entwurf mathematischer Modelle entweder auf der Grundlage der Algorithmen der Selbstorganisation (siehe z. B. [3]) oder mit Hilfe der u. a. auch in der mathematischen Statistik in den letzten Jahren entwickelten Auswahlkriterien für Modelle optimaler Kompliziertheit (siehe [4]).

3.1. *Selbstorganisation von Vorhersagemodellen*

Angewendet wurde ein Programmpaket zur Selbstorganisation mathematischer Modelle (Methode der gruppenweisen Berücksichtigung der Argumente), wie es in [3] beschrieben wurde. Die Anwendung dieses Programmpakets erfordert vom Nutzer die folgende A-priori-Information:

- Beobachtungen von Kenngrößen (Zeitreihen)
- Modellklasse
  Im vorliegenden Fall wurden lediglich lineare Modelle
  $$x_t = \sum_{i=1}^{N} \sum_{k=0}^{T} c_{ik} \cdot u_{it-k}$$
  gewählt, wobei u_{it} die möglichen Einflußgrößen darstellt
- maximale Verzögerung T
- Information über die Systemstruktur (z. B. u_i hat keinen Einfluß auf x) kann verwendet werden
- Auswahlkriterium und Aufteilungsvorschrift (in Lern- und Prüffolge).

Mit den verschiedenen kombinierten Auswahlkriterien (Regularitäts- und Unverzerrtheitskriterien) und verschiedenen Vorschriften zur Aufteilung in Lern- und Prüffolge wurden jeweils 5 verschiedene Modelle erstellt, aus denen entsprechend der Anpassung das beste Modell ausgewählt wurde. Als maximale Verzögerung wurde generell $T = 24$ gewählt (unter Berücksichtigung der offensichtlichen Saisonkomponente).
Erzeugt wurden sowohl lineare univariate Modelle (d. h. $N = 1$, $u_{1t-k} = x_{t-k}$, $c_{10} = 0$), lineare bivariate Modelle (d. h. $N = 2$, $u_{1t-k} = x_{t-k}$, $c_{10} = 0$, u_{2t} Monatsdurchschnittstemperatur des untersuchten FAL) als auch lineare multivariate Modelle ($N = 20$, $u_{1t-k} = x_{t-k}$, $c_{10} = 0$, u_{it} Elektroenergieverbrauch aller anderen FAL, $i = 2, \ldots, 10$, u_{jt} Monatsdurchschnittstemperatur aller Territorien i, $j = 10 + i$). Die Ergebnisse sind in Tafel 3 zusammengefaßt.

3.2. *Auswahl von Modellen optimaler Kompliziertheit*

Wie in [1] gezeigt wurde, kann für stabile Systeme jedes ARIMA-Modell mit beliebiger Genauigkeit durch hinreichend große AR-Modelle ersetzt werden. Voraussetzung dafür ist eine stationäre Zeitreihe, die im vorliegenden Fall durch Elimination des Trends und/oder der Saisonkomponente erzeugt wird. Unbekannt ist die Ordnung des AR-Modells. Es wurde ein Programmpaket entwickelt, das verschiedene Kriterien zur Auswahl eines AR-Modells optimaler Kompliziertheit anwendet (ausführlicher siehe [4]).
Zur Anwendung kamen:

1. Kriterien ohne Aufteilung der Beobachtungen, die vor allem in der mathematischen Statistik entwickelt wurden (10 Kriterien)
2. Cross-Validation (siehe [5])
3. Kriterien mit Aufteilung der Beobachtungen in Lern- und Prüffolge, die in der Selbstorganisation mathematischer Modelle Anwendung finden, und deren Kombination (29 Kriterien).

Die erhaltenen Ergebnisse sind in Tafel 4 dargestellt.

Schlußfolgerungen

Der Erkenntnisgewinn läßt sich beim derzeit erreichten Arbeitsstand folgendermaßen zusammenfassen:

– Die auf einer sorgfältigen Auswertung des Datenmaterials und der Einbeziehung von A-priori-Informationen beruhende ARIMA-Technik hat sich bei der Elektroenergievorhersage bewährt. Die bereitgestellten Modelle sind parametersparsam, robust und einfach zu handhaben.
– Die Aufgabenstellung für 10 Vorhersageprobleme (20 Zeitreihen) stellt unter den derzeitigen Softwarebedingungen eine obere Grenze dar. Um die unbestrittenen Vorzüge der Box-Jenkins-Technik bei bivariaten Problemen größeren Umfangs rationell nutzen zu können, bedarf es der Integration intelligenter Komponenten vor allem bei der Mustererkennung. Hierzu werden weitere Untersuchungen durchgeführt.
– Vergleicht man die angewendeten Verfahren der rechnergestützten Modellauswahl (Abschn. 3.), so zeigt sich, daß sich der wesentlich höhere Rechenaufwand bei der Selbstorganisation mathematischer Modelle für derart einfache Modellstrukturen wie autoregressive Modellansätze nicht lohnt. Der entsprechend große Rechenzeitaufwand bei der Cross-Validation-Technik führt zu vergleichbarer Vorhersagegenauigkeit für 1985. Demgegenüber ist der Rechenzeitaufwand bei Auswahl der Modelle optimaler Kompliziertheit äußerst gering und kann bei Einschränkung der Kriterienvielfalt noch weiter reduziert werden.
– Ein Vergleich zeigt darüber hinaus:
  a) Die Berücksichtigung der A-priori-Information über die Zeitreihe in Form der Kenntnis ihrer Saisonkomponente und deren Elimination kann auch beim rechnergestützten Entwurf einen wesentlichen Gewinn an Vorhersagegenauigkeit erbringen, wobei eine gleichzeitige Elimination von Trend- und Saisonkomponente durchgängig sehr schlechte Vorhersagen ergibt.
  b) Innerhalb der Kriterien ohne Aufteilung der Beobachtungen erwiesen sich folgende Kriterien als geeignet:
     . Schätzung der Varianz der Abweichung
     . AIC-Kriterium nach *Akaike*
     . Vorhersagekriterium
  c) Innerhalb der Kriterien mit Aufteilung der Beobachtungen bestätigte sich die Vermutung, daß insbesondere kombinierte Kriterien gute Vorhersageergebnisse erbringen. Im vorliegenden Fall erwiesen sich als beste Kriterien:
     . symmetrisches Stabilitätskriterium
     . Kombination von symmetrischem Stabilitätskriterium und absolut störstabilem Kriterium.
     Es zeigte sich ein signifikant besseres Ergebnis bei einer Aufteilung der Beobachtung in zwei Teile, wobei die letzten Realisierungen in die Lernfolge und die ersten in die Prüffolge gehen, als bei einer alternierenden Aufteilung.
  d) Ein Vergleich der Kriterien ohne Aufteilung der Beobachtungen mit den Kriterien mit Aufteilung der Beobachtungen ergibt, daß die ersteren auf relativ komplizierte Modelle und letztere auf wesentlich einfachere Modelle führen. Bei Elimination der Trendkomponente oder der Saisonkomponente ergeben sich durchgängig die besten Ergebnisse, wobei die in b) und c) ausgewählten besten Kriterien vergleichbare Ergebnisse liefern.
– Der Vergleich von Vorhersagen auf der Grundlage dialoggestützter und rechnergestützter Modellauswahl läßt keine gravierenden quantitativen Unterschiede in der Treffsicherheit erkennen. Die dialoggestützte Modellwahl bedient Nutzer, die in den Modellauswahlprozeß Einsicht nehmen wollen und dazu auch die notwendigen mathematisch-statistischen Kenntnisse und die Zeit für den Dialog mitbringen und neben möglichst guten Vorhersagen für ausgewählte Positionen auch Informationen über Gesetzmäßigkeiten in den Zeitreihen wünschen. Die rechnergestützte Modellwahl bedient Nutzer, die sich nur für die eigentliche Vorhersage interessieren und kaum Kenntnisse über mathematisch-statistische Verfahren und Zeit für den Rechnerdialog besitzen, aber Probleme großen Zeitreihenumfangs zu bearbeiten haben.
– Aus dem Vergleich der erhaltenen Vorhersagen mit den Experteneinschätzungen, die einen durchschnittlichen Fehler von $MAD_{84} = 12{,}4\,\%$ sowie $MAD_{85} = 14{,}8\,\%$ erzielten, geht hervor, daß bezüglich Treffsicherheit keine durchgängige Überlegenheit für eine der beiden Vorgehensweisen zu verzeichnen ist. Das trifft nach Erfahrungen der Autoren auch auf viele andere Anwendungen zu. Das schmälert jedoch nicht den Nutzen rechnergestützter Vorhersagen, die mit zunehmendem Umfang an Zeitreihen durch automatische Modellgenerierung rationeller als Expertenschätzungen erstellt werden können.
– Eine wesentlich höhere Treffsicherheit von Vorhersagen ist durch Verbindung beider Vorgehensweisen zu erwarten. Beim traditionellen Herangehen an die Vorhersage stehen rechnergestützte Vorausberechnungen und Expertenschätzungen nebeneinander. Um diesen Dualismus mit der Gefahr subjektiv bedingter Überbetonung für eine der beiden Seiten zu überwinden, müßte das in der Expertenschätzung akkumulierte Wissen bei der rechnergestützten Modellwahl Verwendung finden. Hierzu sind jedoch weiterführende Überlegungen in Richtung auf eine maschinelle Wissensverarbeitung anzustellen.
– Die starken Unregelmäßigkeiten in den FAL-Zeitreihen, die sich nicht zuletzt in hohen Fehlerschwankungen zwischen den Vorhersagen von 1984 und 1985 ausdrücken, und die Ergebnisse der Selbstorganisation (Einbeziehung aller Zeitreihen in das Problem) legen nahe, Vorhersagen auf höherer Aggregationsebene anzustreben. Da die Elektroenergieversorgungsplanung des Betriebes ohnehin auf Bezirksebene erfolgt, ist dieser Fortgang auch von praktischem Interesse. Mit den ARIMA-Modellen sind dazu bereits erste Rechnungen durchgeführt worden. Dabei lagen die bivariaten Ansätze deutlich besser als die univariaten und auch als die Experten. Die anteilige Fehlersenkung betrug für 1985 im Vergleich zu den FAL-Vorhersagen durchschnittlich 48 %.

Tafel 3. Vorhersagegenauigkeit mit Selbstorganisation

FAL	univariat		bivariat		multivariat	
	MAD_{84} [%]	MAD_{85} [%]	MAD_{84} [%]	MAD_{85} [%]	MAD_{84} [%]	MAD_{85} [%
1	9,9	8,5	12,1	10,9	11,7	13,8
2	13,8	15,0	13,4	19,8	10,5	13,6
3	13,5	13,8	9,1	14,9	16,1	13,8
4	8,4	–	12,0	–	8,5	–
5	16,0	14,2	14,7	12,4	11,7	13,0
6	7,6	9,7	6,8	11,7	5,4	11,3
7	25,6	18,7	22,3	23,3	9,5	19,4
8	24,1	17,8	14,3	14,1	14,5	16,2
9	25,5	–	15,5	–	20,7	–
10	18,1	22,8	17,7	22,7	26,5	26,2
⌀	16,3	15,1	13,8	16,2	13,5	15,9

Tafel 4. Vorhersagegenauigkeit bei Auswahl von Modellen optimaler Kompliziertheit (Elimination der Saisonkomponente)

FAL	Kriterium				Cross-Validation	
	mit Aufteilung der Beobachtungen		ohne Aufteilung der Beobachtungen			
	MAD_{84} [%]	MAD_{85} [%]	MAD_{84} [%]	MAD_{85} [%]	MAD_{84} [%]	MAD_{85} [%]
1	9,3	11,4	9,1	11,6	11,2	12,0
2	12,1	15,6	11,3	14,3	10,6	10,6
3	18,0	21,2	19,2	17,1	17,4	24,9
4	9,2	–	9,8	–	10,2	–
5	16,5	18,6	16,6	18,7	20,4	20,8
6	4,7	10,3	6,4	10,5	4,4	10,6
7	16,7	20,1	15,9	20,1	15,9	20,1
8	15,7	19,3	16,0	19,1	15,3	19,1
9	18,5	–	18,6	–	18,6	–
10	10,6	11,0	15,5	13,3	18,9	13,6
⌀	13,1	15,9	13,8	15,6	14,3	16,4

Literatur

[1] *Matthes, B.; Müller, J.-A.:* Extrapolation stochastischer Prozesse. msr, Berlin 21 (1978) 3, S. 139–143.
[2] *Götze, W.; Sellmann, J.:* Univariate und bivariate Zeitreihenanalyse und Vorausberechnung im Dialog mit dem SM4. Rechentechnik/Datenverarbeitung 23 (1986) 9, S. 29–30.
[3] *Ivachnenko, A. G.; Müller, J.-A.:* Selbstorganisation von Vorhersagemodellen. Berlin: VEB Verlag Technik 1984.
[4] *Müller, J.-A.:* Auswahl von Modellen optimaler Kompliziertheit. msr, Berlin 30 (1987) 7, S. 302–306.
[5] *Stone, M.:* Cross-validatory Choice and Assesment of Statistical Predictions. J. R. Statist. Soc. B 36 (1974) 2, S. 111–147.
msr 8683

Zu Besuch im „Land der Morgenfrische"

Wer auf dem internationalen Flughafen von Pjöngjang, der Hauptstadt der Koreanischen Demokratischen Volksrepublik, ankommend nach dem vertrauten „time table" sucht, wird enttäuscht sein. Bei insgesamt 6 Maschinen, die wöchentlich hier landen, um dann zurückzufliegen, kommen keine Touristenströme auf. Man ahnt, daß man ein Land betritt, das Ungewohntes und Außergewöhnliches bietet. Korea kann auf eine jahrtausendealte Geschichte mit einer hochstehenden Kultur verweisen. Hier wurde z. B. der Buchdruck mit beweglichen Lettern 200 Jahre vor *Gutenberg* erfunden.

Man spürt allerorts den großen Stolz der Koreaner auf die Errungenschaften des sozialistischen Staates. Weiß man um den harten Neubeginn nach dem Koreakrieg (1951 bis 1953) und die ständige Bedrohung aus dem US-amerikanisch besetzten Süden des Landes, so empfindet man uneingeschränkte Bewunderung für das schon Geleistete.

Besonders deutlich ist das in Pjöngjang zu spüren, das 1953 so gründlich weggebombt war, daß man erwog, es an anderer Stelle neu aufzubauen. Heute beherbergt Pjöngjang in seinen Neubauten über eine Million Einwohner, die wohl in einer der saubersten Großstädte der Welt leben (Bild), zumal im Nahverkehr die Metro und der Trolleybus dominieren und fast keine Privat-PKW fahren. Auch die sonst in Ostasien, z. B. China, so typischen Radfahrer vermißt man in Pjöngjang; ebenfalls fehlen die in anderen Millionenstädten nicht wegzudenkenden Verkehrsampeln vollständig.

Das gestiegene Interesse der KDVR an einer Vertiefung der Beziehungen zu den sozialistischen Ländern ist unübersehbar. Das betrifft insbesondere den Bereich der Schlüsseltechnologien. Hier versucht man, mit beschleunigtem Tempo Anschluß an das fortgeschrittene internationale Niveau zu finden. Die Führung der Partei der Arbeit Koreas fordert, „... die technische Umgestaltung durchzuführen, in der Produktion die komplexe Mechanisierung, Automatisierung und Steuerungstechnik einzuführen ..." (*Kim Dschong Il*, Mitglied des Präsidiums des Politbüros und Sekretär des ZK der Partei der Arbeit Koreas). Damit ist vor allem auch die Akademie der Wissenschaften der KDVR angesprochen.

Auf dem Gebiet der Automatisierungstechnik bestehen zwischen der KDVR und der DDR vielfältige Beziehungen, u. a. in der Ausbildung. Studenten der KDVR sind seit langem an unseren Hochschulen zu finden.

Die Autoren hatten im Sommer 1986 die Gelegenheit, während eines Studienaufenthalts in der Koreanischen Demokratischen Volksrepublik u. a. drei Institute der Akademie der Wissenschaften zu besuchen. Die Besuche wurden auf der Grundlage eines Abkommens der Akademien beider Länder durchgeführt und hatten die Anbahnung einer engeren Zusammenarbeit mit dem Zentralinstitut für Kybernetik und Informationsprozesse der AdW der DDR zum Ziel.

Die älteste und größte der besuchten Einrichtungen, das **Institut für Automatisierung**, besteht seit 1967 und beschäftigt etwa 500 Mitarbeiter, davon rund 200 Wissenschaftler. Arbeitsgegenstand ist die Automatisierung kontinuierlicher Prozesse, im wesentlichen in der Metallurgie, der Chemie, in Zementwerken sowie in der Leichtindustrie. Neben der Grundlagenforschung besteht vor allem die Aufgabe, die für die Automatisierung dieser Prozesse erforderliche Meßtechnik zu entwickeln und direkt in die Produktion überzuleiten. In Zukunft soll verstärkt der Entwurf komplexer Automatisierungsanlagen, insbesondere die Anwendung moderner rechnergestützter Entwurfstechniken, in den Mittelpunkt rücken.

Aus Forschungsgruppen dieses Institutes und des Instituts für Maschinenbau wurde 1984 das **Institut für Steuerungsmaschinen** gebildet, das heute etwa 200 Mitarbeiter, davon rund 110 Wissenschaftler, zählt. Arbeitsgebiete sind NC-Steuerungen von Werkzeugmaschinen und Industrieroboter (sowohl Steuerungen als auch Sensoren und Robotermechanik).

Ebenfalls aus einem Bereich des Instituts für Automatisierung wurde 1983 das **Institut für Rechentechnik** gebildet, das inzwischen etwa 200 Mitarbeiter zählt. Die Forschungen sind auf die Schaffung einer eigenen rechentechnischen Industrie gerichtet, wobei Kleinrechner und Personalcomputer im Vordergrund stehen. Die Arbeitsgebiete sind:

- Rechnerarchitektur
- Entwicklung von 16-Bit-PC
- Externe Speicher
- Bildverarbeitung/Computergrafik
- Softwaretechnologie
- Expertensysteme.

Ein spezielles Problem ist die Darstellung und Verarbeitung der koreanischen Schriftzeichen. Diese ähneln bei flüchtiger Betrachtung den chinesischen, haben aber im Gegensatz dazu keine eigene Bedeutung, sondern sind aus Buchstaben zusammengesetzte Wortsilben. Zwar kann man das koreanische Alphabet vom Umfang her mit unserem vergleichen, jedoch ist die räumliche Komposition der Buchstaben ungleich komplizierter. Es sei nur angemerkt, daß es uns nicht gelungen ist, während unseres Aufenthaltes eine koreanische Schreibmaschine zu sehen, dafür aber ein Experimentiermuster eines PC, der neben russischen und lateinischen auch koreanische Schriftzeichen verarbeitet. Dieses Problem ist keineswegs von untergeordneter Bedeutung, da eine breite Einführung der Rechentechnik nur über die koreanische Sprache möglich ist.

In den zwei Wochen unseres Aufenthalts haben wir nicht nur einen Einblick in die Möglichkeiten und Ziele der AdW der KDVR erhalten, sondern auch viele sympathische und gastfreundliche Menschen kennengelernt, die bescheiden, diszipliniert und angestrengt am sozialistischen Aufbau arbeiten.

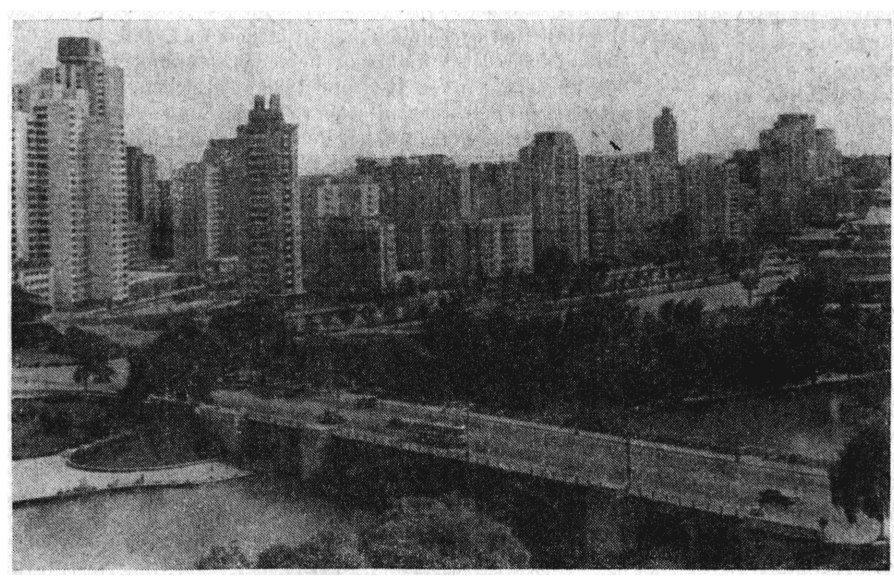


Bild. Blick auf Pjöngjang, die Hauptstadt der KDVR

msr 8595 *P. Brettschneider; H. Fuchs*

Technische Universität Warschau Fakultät Elektronik Institut für Automatik

Im Dezember 1986 hatte der Verantwortliche Redakteur der msr anläßlich einer Dienstreise nach Warschau Gelegenheit, das Institut für Automatik der TU Warschau kennenzulernen. Dieses international renommierte Institut hat auch das fachwissenschaftliche Leben in der DDR schon vielfältig befruchtet. Man denke dabei nur an die Beziehungen zur Sektion Technische und Biomedizinische Kybernetik (TBK) der TH Ilmenau und die aktive Teilnahme an den dortigen Internationalen Wissenschaftlichen Kolloquien. So ist es sicher auch für Sie, verehrte Leser, interessant, über dieses Institut und seine Bemühungen in Lehre und Forschung ein bißchen mehr zu erfahren, zumal sich verschiedentlich auch Parallelen oder Abweichungen zu den Gepflogenheiten an vergleichbaren Einrichtungen in unserem Lande feststellen lassen. Als Gesprächspartner (Bild 1) stellten sich Herr Prof. Dr.-Ing. *Władisław Findeisen*, der Gründer dieses Instituts und frühere Rektor der TU Warschau, sowie Herr Doz. Dr.-Ing. habil. *Krzysztof Malinowski*, der jetzige Institutsdirektor, zur Verfügung. Außerdem war Herr Dr.-Ing. *Horst Puta*, Sektion TBK der TH Ilmenau, am Gespräch beteiligt. Er weilte am Institut zu Forschungszwecken (wie in den zurückliegenden Jahren schon mehrfach) und erleichterte mit seiner guten Kenntnis des Instituts und seinen profunden Sprachkenntnissen die Verständigung wesentlich. Dafür sei ihm herzlich gedankt.

msr:

Herr Prof. *Findeisen*, Herr Dr. *Malinowski*, die Serie „msr STELLT VOR" hat in unserer Zeitschrift schon eine jahrelange Tradition, der zufolge am Anfang stets die Vorstellung der Gesprächspartner steht. So wollen wir auch heute beginnen.

Prof. *Findeisen*:

Ich studierte bis 1949 hier an der TU Warschau, zunächst Elektrotechnik, später Fernmeldetechnik. Dabei war ich übrigens schon seit 1948 Angestellter der TU. Etwa im Jahr 1951 erwachte mein Interesse an Problemen der Regelungstechnik, und ich begann, mich um die Errichtung eines Lehrstuhls für Automatik zu bemühen. 1954 promovierte ich zum Dr.-Ing. 1955 kam es zur Gründung des Lehrstuhls für Automatik, mit dessen Wahrnehmung ich betraut wurde. 1957 wurde ich zum Dozenten berufen, 1962 zum a. o. Professor. 1970 kam es zur Umwandlung des Lehrstuhls in das Institut für Automatik, dessen Direktor ich bis 1981 war. Zwischenzeitlich wurde ich 1971 zum o. Professor berufen. Von 1981 bis 1985 bekleidete ich das Amt des Rektors der TU Warschau. Seither bin ich wieder am Institut für Automatik als Hochschullehrer und Forscher tätig. In diesem Zusammenhang sind sicher auch eine Reihe von Gastprofessuren erwähnenswert, so 1966/67 an der Case Western Reserve University in Cleveland/USA oder an den Universitäten Rom und Minnesota/USA bzw. an der TH Darmstadt. Von 1977 bis 1978 war ich als wissenschaftlicher Gastmitarbeiter am Internationalen Institut für Angewandte Systemanalyse (IIASA) in Laxenburg/Österreich tätig. Aus meiner langjährigen IFAC-Tätigkeit möchte ich nur erwähnen, daß ich von 1963 bis 1967 das Education Committee leitete. Etwa seit 1970 beschäftigte ich mich intensiv mit hierarchischer Steuerungstheorie. Davon zeugen z. B. mein 1977 in Ihrem Verlag erschienenes Buch „Hierarchische Steuerungssysteme" oder mein im August 1986 in Ihrer Zeitschrift erschienener Beitrag zur hierarchischen Steuerung wasserwirtschaftlicher Systeme. Ich hatte übrigens bisher 37 Doktoranden, von denen 6 inzwischen selbst Professoren geworden sind. 1984 wurde mir von der City University London der Dr. h. c. verliehen. Seit 1975 bin ich Vorsitzender des Komitees für Automatik und Robotik der polnischen AdW und von 1956 bis 1985 war ich auch als Redakteur der polnischen Akademie-Zeitschrift „Archiwum Automatyki i Telemechaniki" tätig, der ich heute noch als Mitglied des Redaktionsbeirats eng verbunden bin.



Bild 1. Interviewpartner

Von links nach rechts: Dr.-Ing. *H. Puta*/TH Ilmenau, Prof. Dr.-Ing. *W. Findeisen*/TU Warschau, Dr.-Ing. *D. Werner*/Red. msr, Dr.-Ing. *P. Tatjewski*/TU Warschau (war kurzzeitig am Gespräch als Dolmetscher beteiligt), Doz. Dr.-Ing. habil. *K. Malinowski*/TU Warschau

Dr. *Malinowski*:

Ich studierte von 1966 bis 1971 an der Fakultät für Elektronik der TU Warschau mit der Spezialisierung Automatik, war anschließend 3 Jahre Forschungsstudent (Doktorand) und promovierte, von Prof. *Findeisen* betreut, 1974 zum Dr.-Ing. Seit diesem Jahr bin ich Mitarbeiter am Institut für Automatik. Zunächst war ich als wissenschaftlicher Assistent tätig. 1976 wurde ich Adjunkt, und nachdem ich mich 1978 habilitiert hatte, wurde ich 1980 zum Dozenten berufen, der ja, im Gegensatz zu Ihrem Lande, in der VR Polen mit den gleichen Rechten wie ein Professor ausgestattet ist. Gleichfalls 1980 wurde ich mit dem Amt des stellvertretenden Institutsdirektors für Erziehung und Ausbildung und 1981 mit dem des stellvertretenden Institutsdirektors für Forschung betraut. 1984 wurde mir schließlich die Funktion des Institutsdirektors übertragen, die ich bis heute wahrnehme. Mein wissenschaftliches Interesse gilt besonders der Steuerung komplexer Systeme und damit der Theorie und den Anwendungen hierarchischer Steuerungen. Ich bin Mitglied eines wasserwirtschaftlichen wissenschaftlichen Komitees der polnischen AdW. 1978/79 führte mich eine Gastprofessur an die Universität Minnesota in Minneapolis/USA, und 1981 war ich Gastwissenschaftler am Institut für Wissenschaft und Technik der Universität Manchester/GB.

msr:

Bitte geben Sie unseren Lesern einen Überblick über die TU Warschau und ordnen Sie dabei Ihr Institut ein.

Prof. *Findeisen*:

Eine höhere technische Ausbildung läßt sich in Warschau bis in das Jahr 1826 zurückverfolgen. Damals wurde ein Technologisches Institut gegründet. Es hatte allerdings nur bis zum Novemberaufstand von 1831 Bestand. Als Vorläufer unserer heutigen Einrichtung kann eine 1898 gegründete russische Hoch-

schule bezeichnet werden, das Warschauer Polytechnische Institut, das dann aber auf russisches Gebiet verlagert wurde. Doch auf dem Platz dieses Instituts wurde 1915 eine polnische Einrichtung gegründet, die TU Warschau. Bereits in der Zeit zwischen den Weltkriegen umfaßte die Hochschule 7 Fakultäten, an denen namhafte polnische Wissenschaftler lehrten. Während des zweiten Weltkrieges wurde die Universität fast völlig zerstört. Auch der Lehrkörper wurde stark dezimiert. Nach dem Kriege wurde die TU 1945 zunächst in Lublin wiedereröffnet und kehrte dann einige Monate später nach Warschau zurück. Seither wurde sie umfassend ausgebaut und nahm eine rasche Entwicklung.

Heute beherbergt die TU Warschau etwa 12000 Direkt- und zwischen 2000 und 3000 Fernstudenten. Der Lehrkörper umfaßt etwa 2500 Personen, davon sind etwa 450 Professoren und Dozenten. Die Universität gliedert sich in 12 Fakultäten und 3 eigenständige Institute mit Fakultätsrechten. Das ergibt nahezu 50 Institute als Grundeinheiten der Universität mit Lehr- und Forschungsaufgaben. Das breitgefächerte Spektrum reicht dabei von einer Fakultät für Architektur über die Fakultät für Elektronik bis hin zur Fakultät für Technische Physik und Angewandte Mathematik oder zur Fakultät für Geodäsie und Kartographie. Die Fakultäten sind in Institute untergliedert. So umfaßt beispielsweise unsere Fakultät für Elektronik, sie ist übrigens die größte an der Universität, 6 Institute:

— Institut für Automatik
— Institut für Informatik und Rechentechnik
— Institut für Grundlagen der Elektronik
— Institut für Nachrichtentechnik
— Institut für Elektroniktechnologie
— Institut für Fernmeldetechnik.

Unser Institut für Automatik absolvieren jährlich etwa 40 Studenten in zwei Seminargruppen. Da es in Polen keine Absolventenvermittlung seitens der Hochschulen gibt, richten sich die Themen der Abschlußarbeiten häufig nach dem aktuellen Arbeitsplatzangebot. Unsere Fakultät hat, wie fast alle Fakultäten an der Universität, das Promotions- und Habilitationsrecht.

msr:

Nun wollen wir spezieller auf Ihr Institut zu sprechen kommen. Dabei wäre zunächst ein Überblick über die wesentlichen Untersuchungsgegenstände interessant.

Dr. *Malinowski:*

Das Gebiet der automatischen Steuerungen ist nach wie vor in rascher Entwicklung begriffen. Wir sind natürlich ständig bemüht, dieser Entwicklung Rechnung zu tragen und sie auf den bei uns bearbeiteten Schwerpunkten mitzubestimmen.

Die Prozesse, die im Mittelpunkt unserer Betrachtungen stehen, wollen wir als gesteuerte Prozesse bezeichnen. Mit ihnen sollen bestimmte, wiederholt auftretende Aufgaben gelöst werden können, z. B. Produktionsaufgaben, Dienstleistungen oder auch die Herstellung von Verbindungen zwischen Teilsystemen einschließlich Lokalisierungsproblemen. In diesem Sinn muß jeder Teil des Prozesses beeinflußbar sein. An solche Prozesse mit der Eigenschaft der Wiederholbarkeit und mit repetierenden Aufgaben wird die Forderung gestellt, daß sie sich immer wieder in bestimmte Zielzustände überführen lassen.

Die Beeinflussung gesteuerter Prozesse während der Arbeit ist abhängig von den Anfangszuständen und von aktuellen Prozeßzuständen, die wiederum meßbar sein müssen. Unter automatischer Steuerung verstehen wir die Beeinflussung der genannten Prozeßklasse durch die Anwendung von Algorithmen und Gerätetechnik. Der Einfluß der Menschen beschränkt sich dagegen auf die Entwurfsphase. Allerdings wollen wir auch die operative Beeinflussung durch den Menschen auf der Grundlage von rechnergestützten Beratungs- und Expertensystemen im Komplex „Automatische Steuerung" mit ansiedeln. In diesem Sinne gehören die automatischen Steuerungen zu den wichtigsten Elementen in technologischen Prozessen. Die Automatisierungstechnik ist eine echte Querschnittsdisziplin mit sehr vielen und unterschiedlichen Anwendungsgebieten. Wir versuchen, dem in Lehre und Forschung gerecht zu werden.

msr:

Können Sie einen Überblick über die Themen des Instituts geben?

Dr. *Malinowski:*

Man kann die bei uns bearbeiteten Themen in solche zur allgemeinen Automatik und solche zur anwendungsbezogenen Automatik unterteilen. Um die ersteren inhaltlich zu fixieren, möchte ich schlagwortartig folgende Begriffe aufzählen:

— allgemeine Regelungstheorie
— mathematische Modellierung und Simulation
— Optimierung
— multivariable Systeme (MIMO — multi-input/multi-output)
— Steuerungsstrukturen und -algorithmen
— Entscheidungshilfen
— rechnergesteuerte Systeme.

Für die Ausbildung in diesen Richtungen ist die Rechentechnik/Informatik von Bedeutung, die daher im Ausbildungsprozeß auch vorgelagert ist.

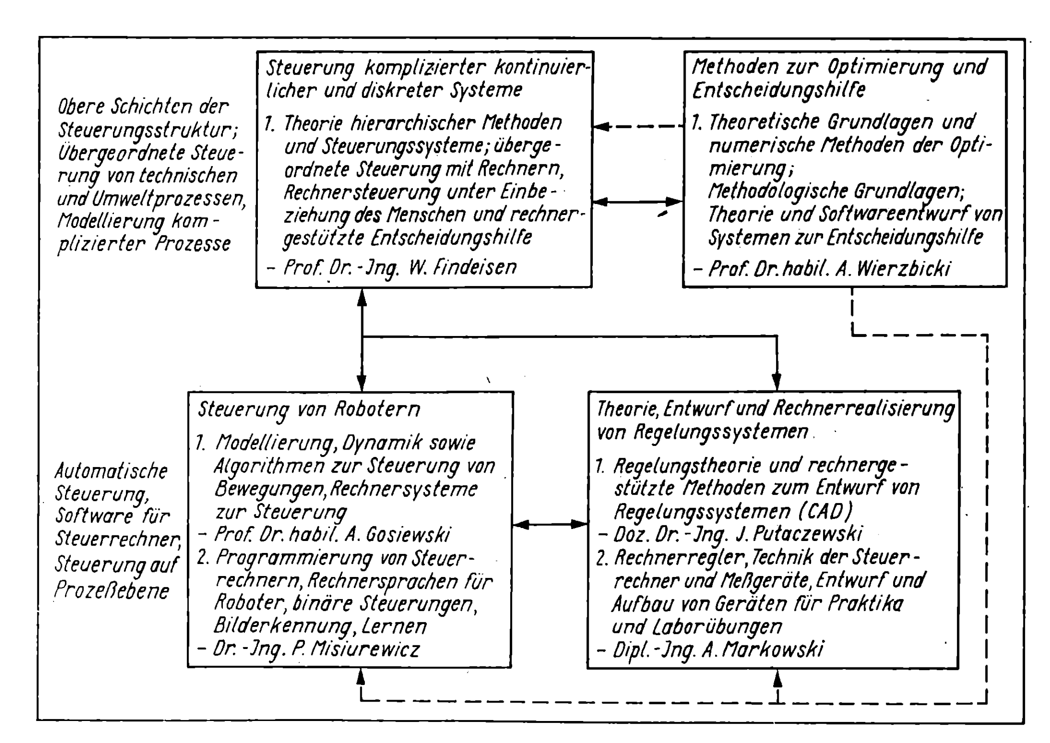


Bild 2. Forschungsrichtungen und wissenschaftliche Forschungsgruppen im Institut für Automatik

——→ Zusammenhang in der Forschung;
- - - -→ Vermittlung von Algorithmen und Programmen

Wir pflegen dabei natürlich eine Zusammenarbeit mit verschiedenen Anwendern

- in der chemischen Industrie
- im Maschinenbau
- in der Elektrotechnik
- bei Energiesystemen
- bei wasserwirtschaftlichen Problemen.

Wir legen bei diesen Kooperationen darauf Wert, daß wir uns nicht langfristig festlegen. Vordergründig beschäftigen wir uns mit allgemeinen Automatisierungsproblemen. Dabei interessieren uns die Abhängigkeiten von der Art der Meßgrößen und der Dynamik der Prozesse. Das gilt übrigens auch für die Stellglieder. Darüber hinaus untersuchen wir spezielle Typen von Reglern und die dazugehörigen Algorithmen. Wir bemühen uns um Werkzeuge (Software-Tools, Geräte, Rechner) für bestimmte Anwendungen.
Ein vorhandener, komplexer Prozeß wird i. allg. mit verschiedenen Steuerungsschichten gekoppelt:

- direkte Steuerungsschichten
- übergeordnete Steuerungsschichten,

so daß hierarchische Steuerungen entstehen, die für uns einen besonderen Schwerpunkt bilden. Bei der Kopplung Prozeß und direkte Steuerung gelangt man zu dezentral geregelten Prozessen. Dort werden die Steuerbeeinflussungen mit hoher Frequenz durchgeführt. In den höheren Hierarchieebenen gelangt man zu aggregierten Modellen. Die Konkretheit der Information nimmt ab. Sie muß aber relevant bleiben; außerdem kann in den höheren Schichten auch der Mensch als Entscheidungsträger mitwirken.
Gemäß dieser Strategie haben wir auch die Unterteilung unseres Instituts in Forschungsrichtungen und wissenschaftliche Forschungsgruppen vorgenommen. Dies läßt sich am besten anhand von Bild 2 verdeutlichen. Es enthält also vier Grundforschungsrichtungen, die man übrigens auch in der Lehre und Ausbildung wiederfindet. Bei uns werden wöchentlich Seminare abgehalten, die den Stand und die Fortschritte in den einzelnen Forschungsrichtungen zum Ausdruck bringen. Die Gruppen haben eigene Vertragsbeziehungen und forschen zu den damit festgelegten Anwendungsgebieten. Wie diese Forschungen gestaltet werden, möge am Beispiel der von Prof. *Findeisen* geleiteten Forschungsgruppe „Steuerung komplizierter kontinuierlicher und diskreter Systeme", in der ich selbst auch mitarbeite, noch etwas vertieft werden. In diesem Problemkreis existieren bei uns vier Hauptanwendungen:

1. *Hauptanwendung*: Wasserwirtschaftliche Systeme und Hochwassersteuerung

Innerhalb dieses Anwendungsgebietes werden gemeinsame Arbeiten mit dem Staatlichen Institut für Meteorologie und Wasserwirtschaft im Ministerium für Umweltschutz und auch mit Mitarbeitern der polnischen Akademie der Wissenschaften durchgeführt, in deren Ergebnis beispielsweise ein spezieller Hybridrechner für die Hochwassersteuerung entwickelt wurde.

2. *Hauptanwendung*: Steuerung von Informationsübertragungsnetzen
3. *Hauptanwendung*: Neuronenmodelle und Identifikation lernender Systeme
4. *Hauptanwendung*: Steuerung diskreter Fertigungsprozesse

Hierbei arbeiten wir übrigens eng mit der Universität Manchester zusammen.
In ähnlicher Weise fächern sich auch die anderen Forschungsgruppen auf.

msr:

Bitte umreißen Sie kurz den Ausbildungsverlauf Ihrer Studenten.

Dr. *Malinowski*:

Alle Studenten müssen eine Aufnahmeprüfung ablegen. Ist diese erfolgreich verlaufen und werden sie immatrikuliert, können sie die Ausbildungsrichtung selbst wählen, wobei allerdings die ihnen offenstehenden Möglichkeiten von der Qualität des Abschlusses der Aufnahmeprüfung abhängen. Diese Aufnahmeprüfungen finden stets im Juli statt. Die Studenten mit guten Prüfungsergebnissen beginnen dann im Oktober mit ihrem Studium, die nicht so guten beginnen in einem 0. Semester mit einer Mathematikvertiefung und legen dann erneut eine Aufnahmeprüfung ab. Auf diese Weise haben wir ein „rollendes" Immatrikulationssystem. In den unteren Semestern durchlaufen alle Studenten eine einheitliche Ausbildung in Mathematik und Physik sowie eine richtungsabhängige Ausbildung in Informatik, Informationsübertragung und Elektronik. Gemäß der Fächerung unserer Fakultät in 6 Institute haben unsere Studenten 6 Möglichkeiten der Spezialisierung, eine davon ist natürlich Automatik. Im weiteren Ausbildungsfortgang ist ein Teil der Fächer obligatorisch, ein anderer Teil wahlobligatorisch. Übrigens unterstehen die Studenten bis zum 5. Semester der Fakultät, danach dem jeweiligen Institut. Im 7. Semester spezialisieren sich die Studenten des Instituts für Automatik dann auf eine der 4 Forschungsrichtungen des Instituts (siehe Bild 2). Sie beginnen dann auch, sich mit ihrer Diplomaufgabe zu beschäftigen. Im 9. Semester werden sogenannte Diplomkurse durchgeführt, die durch Kurse in anderen Instituten ergänzt werden. Das 10. Semester ist dann der Anfertigung der Diplomarbeit gewidmet, wobei wöchentlich 2 Stunden für Diplomseminare genutzt werden, in denen über die Fortschritte bei der Bearbeitung berichtet wird.
Nur wenige unserer Studenten können nach Abschluß des Studiums zu einem Forschungsstudium am Institut verbleiben. Aber unsere Studenten haben i. allg. keine Schwierigkeiten bei der Arbeitsplatzwahl, da sie erfahrungsgemäß über gute methodologische Fähigkeiten und breite rechentechnische Kenntnisse verfügen.

msr:

Welche Möglichkeiten des rechentechnischen Kenntniserwerbs bestehen für Ihre Studenten und welchen Anteil haben Praktika an der Ausbildung?

Dr. *Malinowski*:

Die rechentechnische Ausbildung, die in den Händen des Instituts liegt, setzt mit Studienbeginn ein. An Personalcomputern vom Typ C 64 werden die Studenten in BASIC und PASCAL trainiert. Im 2. Semester erfolgt an in Richtung PDP 11/70 er-

Bild 3. Diplomand am IBM-Personalcomputer

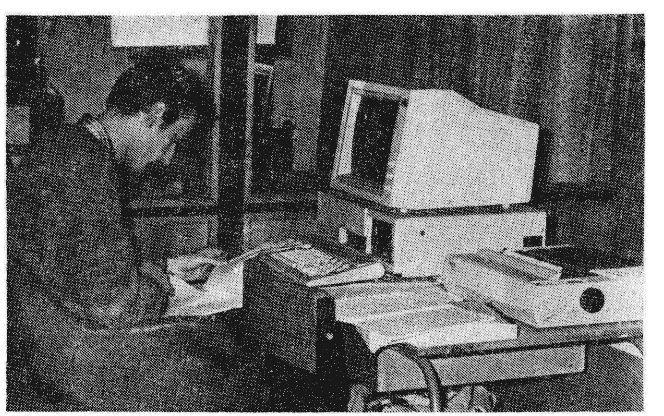
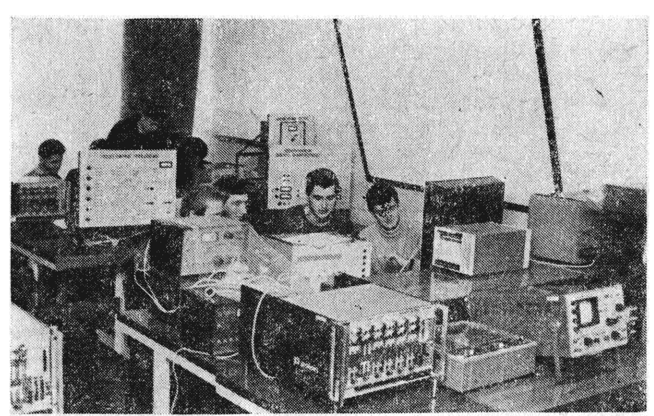


Bild 4. Im Labor für Automatische Steuerungen



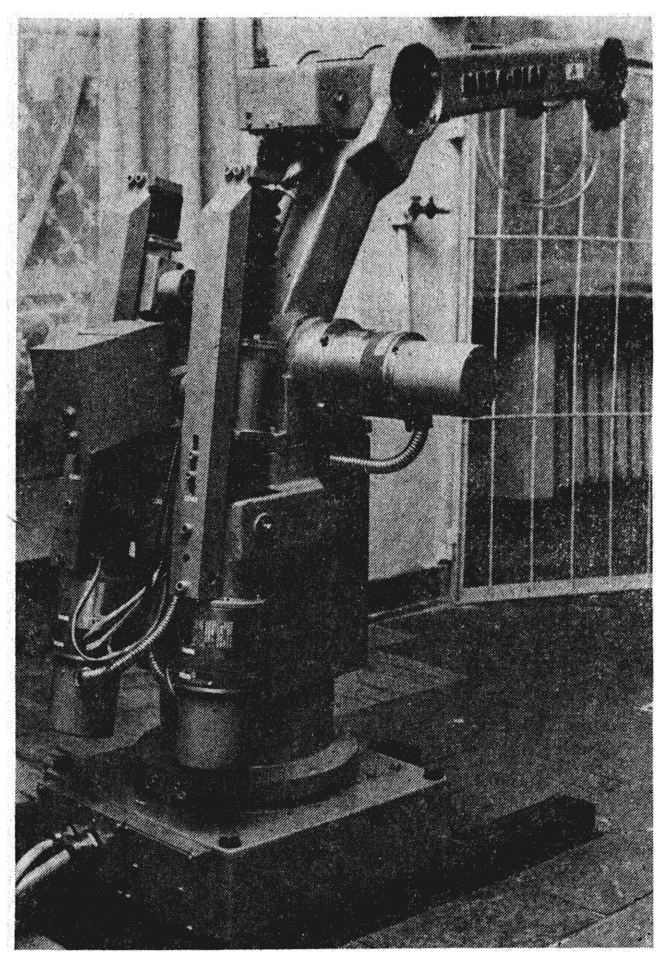


Bild 5. Industrieroboter polnischer Herstellung im Labor

weiterten Rechnern vom Typ SM 4 die Unterweisung in PASCAL und FORTRAN. Im 3. Semester beschäftigen sich die Studenten mit Anwendungsprogrammen und Problemlösungen am C 64 und an der SM 4. In den höheren Semestern werden selbständig Arbeiten am Rechner durchgeführt. Das gilt natürlich auch für den großen Beleg und die Diplomarbeit, wobei wir auf IBM-Personalcomputer orientieren (Bild 3).
Unsere Praktika umfassen etwa 25 ... 30% der Ausbildung. Es werden neben denen in Rechentechnik auch Grundlagenpraktika in Elektronik und in Automatisierungstechnik (Bilder 4 und 5) durchgeführt. Zu den automatisierungstechnischen Versuchen zählen solche zur Modellierung, zu analogen und digitalen Regelungen, zu verschiedenen Problemlösungen und zu rechnergesteuerten Systemen.

msr:

Was können Sie über die internationalen Beziehungen Ihres Instituts berichten?

Dr. *Malinowski*:

Wir unterscheiden bei unseren zahlreichen internationalen Kooperationen zwischen solchen mit offiziellem Charakter (also auf der Basis von unterschriebenen Verträgen) und anderen, die ohne vertragliche Bindung nur aufgrund echten Interesses untereinander bestehen.
Zu den Sie sicherlich besonders interessierenden Beziehungen zu Einrichtungen in der DDR sind in erster Linie folgende zu nennen:
Langjährige gute Beziehungen bestehen zur Sektion Technische und Biomedizinische Kybernetik der TH Ilmenau, insbesondere zur Gruppe um Prof. *K. Reinisch*, bei den Problemen der hierarchischen Steuerungen. Aber auch mit der TH Leipzig, der Gruppe um Prof. *W. Schäfer* und Dr. *Engelmann*, pflegen wir eine intensive Zusammenarbeit. Darüber hinaus bestehen auch gewisse Beziehungen zum Zentralinstitut für Kybernetik und Informationsprozesse der AdW der DDR, dort zu der Gruppe um Prof. *A. Sydow*.
Eine langjährige fruchtbare Zusammenarbeit (in den letzten Jahren wegen der amerikanischen Boykottmaßnahmen im Technologietransfer etwas eingeschränkt) besteht auch zur Universität Minnesota/USA. Darüber hinaus erachten wir als äußerst wichtig unsere Zusammenarbeit mit dem Internationalen Institut für Angewandte Systemanalyse (IIASA) in Laxenburg/Österreich und mit der Universität Rom. Nicht vertraglich gebundene, aber doch recht enge Beziehungen bestehen auch zur City University in London und zum Institut of Science and Technology der Universität Manchester/GB.

msr:

Wie stets möchten wir unsere Folge damit beschließen, daß wir Sie nach den aus Ihrer Sicht wichtigsten Ergebnissen und Erfolgen Ihres Instituts befragen.

Dr. *Malinowski*:

Nun, ich glaube, der Gründer der Schule der hierarchischen Steuerungen, Prof. *Findeisen*, und die unter seiner Leitung erzielten Forschungsergebnisse sind ein besonderes Aushängeschild unseres Instituts. Letztlich rührt daher auch in besonderer Weise der gute Ruf unseres Instituts. Die Ergebnisse sind mit hohen Auszeichnungen gewürdigt worden und Prof. *Findeisen* selbst, schon längere Zeit korrespondierendes Mitglied der polnischen AdW, ist vor einigen Monaten zum ordentlichen Mitglied berufen worden. Das ist die höchste wissenschaftliche Auszeichnung.
In diesem Zusammenhang möchte ich ein wichtiges Buch erwähnen, nämlich „Control and Coordination in Hierarchical Systems", das im Verlag John Wiley & Sons erschien. Außerdem ragt aus dem Forschungsgeschehen unseres Instituts sicherlich die Gruppe von Prof. *A. Wierzbicki* heraus, die sich intensiv mit Optimierungsalgorithmen beschäftigt und dabei führend in Polen ist. Prof. *Wierzbicki* arbeitete übrigens 6 Jahre lang am IIASA und zeichnete sich dabei mit Arbeiten zur mehrkriterialen Entscheidungsfindung aus.
Die beiden Forschungsgruppen von Prof. *Findeisen* und Prof. *Wierzbicki* sind auch diejenigen, die das meiste Geld für das Institut erwirtschaften. Es gäbe hierbei sicher noch manches zu berichten (auch aus den anderen Forschungsgruppen), aber das sind wohl die wesentlichsten Ergebnisse.

msr:

Herr Prof. *Findeisen*, Herr Dr. *Malinowski*, im Namen der Leser der msr möchte ich Ihnen für Ihre interessanten Auskünfte ganz herzlich danken.

msr 8681 *D. Werner*

Stochastische Suchverfahren. Von *P. H. Müller, V. Nollau* und *A. I. Polovinkin.* Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1986. 90 Seiten, 16 Bilder, 4 Tafeln, 8 Ablaufpläne, 16,50 M.

Optimierungsverfahren mit stochastischer Suche haben sich bei der Extremwertermittlung von Funktionen bewährt, die nicht durch einen analytischen Ausdruck, sondern nur punktweise, z. B. durch Messung oder Berechnung, verfügbar sind. Bei solchen Verfahren werden die Näherungspunkte sukzessiv als Realisierungen von Zufallsvektoren ermittelt, deren statistische Parameter in jedem Schritt nach einem aus heuristischen Überlegungen hervorgegangenen Algorithmus festgelegt werden. Dieser ist insofern adaptiv, als aufgrund gewonnener Information der zufällige Charakter der Suche zugunsten eines stärker deterministischen Vorgehens eingeschränkt und damit die Aussicht auf Konvergenz erhöht wird.

Das Buch stellt in anwendungsorientierter Form einige stochastische Suchverfahren vor. Die im Kapitel 1 beschriebenen Verfahren zur Suche lokaler Maxima verwenden normalverteilte Zufallsvektoren, deren Streuung in jedem Schritt reduziert wird. Neben elementaren Algorithmen werden auch Varianten mit quadratischer Approximation der Zielfunktion sowie mit der Fähigkeit zur Maximumsuche an gekrümmten Kammlinien angeboten. Leider fehlt jeder Hinweis darauf, unter welchen Bedingungen und aus welchen Gründen die stochastische Suche günstiger als vergleichbare gradientenfreie deterministische Verfahren sein kann.

Im Kapitel 2 werden Verfahren zur Suche des globalen Maximums behandelt, die im allgemeinen Elemente der lokalen Suchtechnik verwenden, aber durch die Benutzung gleichverteilter Zufallsvektoren die Chance geben, den Einzugsbereich eines lokalen Maximums zu verlassen. Als Beispiele seien die „Methode der konkurrierenden Punkte" und die „Känguruh-Methode" genannt.

Kapitel 3 eröffnet die Möglichkeit, stochastische Suchverfahren über den Rahmen der parametrischen Optimierung hinaus auch zur strukturellen Optimierung bei der Projektierung technischer Systeme einzusetzen. Dabei bedeuten die globalen Suchschritte jeweils einen Strukturwechsel, die lokalen Suchschritte die Optimierung innerhalb der angenommenen Struktur. Als Beispiel wird über die optimale Lokalisation von Bedien- und Anzeigeelementen auf einem Steuerpult referiert.

Ein Anhang mit einer Einführung in die Normal- und die Gleichverteilung beschließt das Buch, das als Anleitung zur Verwendung stochastischer Suchverfahren empfohlen werden kann.

B 2222 *H. L. Burmeister*

Echtzeitprogrammierung bei Automatisierungssystemen. Von *W. Schaufelberger, P. Sprecher* und *P. Wegmann.* Stuttgart: B. G. Teubner 1985. 170 Seiten, 91 Bilder.

Die Einbeziehung moderner Rechentechnik in Automatisierungssysteme bedingt die Echtzeitdatenverarbeitung und folglich auch die Echtzeitprogrammierung. Damit steht der Automatisierungsingenieur vor der relativ neuen Aufgabe, seine ureigenen Probleme mit der zur Verfügung stehenden Rechentechnik in Einklang zu bringen bzw. diese Rechentechnik seinem Problem angepaßt auszuwählen. Zweckmäßigerweise muß er sich dazu grundlegendes Wissen über die Programm- und Datendarstellung, die Programmierung mit Assembler- und höheren Programmiersprachen, über Betriebssysteme und über die besonderen Erfordernisse des Echtzeitbetriebs aneignen. Genau diesem Anliegen, zugeschnitten auf Automatisierungsaufgaben, widmet sich das Buch.

Einleitend wird grundsätzlich der Begriff Automatisierungssystem (technischer Prozeß, Automatik als Oberbegriff für Überwachen, Steuern und Regeln) diskutiert, wobei die Automatik von einem Computer realisiert werden soll. Anschließend wird ein Überblick über die Grundlagen der Programmierung vermittelt. Dieses Kapitel beschäftigt sich also mit der beschreibenden Darstellung von Daten und seriellen wie parallelen Programmen (Flußdiagramme, Struktogramme, PASCAL-Notation, Baumdiagramme, Datentypen, statische und dynamische Datenstrukturen, Zustandsdiagramme, Petri-Netze, Syntax und Semantik von Programmiersprachen usw.). Dem folgt die Programmierung mit Assemblersprachen, danach die Programmierung in höheren Programmiersprachen mit einschätzenden Betrachtungen zu FORTRAN, ALGOL, COBOL, BASIC, FORTH, PL1, APL, PASCAL, Modula-2, PORTAL und Ada. Zu PASCAL, BASIC und FORTRAN werden etwas intensivere Aussagen gemacht. Dann wird auf die Arbeitsweisen von Compiler und Interpreter hingewiesen. Im Vergleich zu den bisherigen Kapiteln wird nun recht ausführlich auf Aufbau und Funktionen von Betriebssystemen eingegangen, um die Vorbereitung für die Echtzeitprogrammiertechnik zu treffen. Aufgaben und Aufbau von Echtzeitbetriebssystemen werden erläutert und die Echtzeitprogrammierung mit „höheren" Echtzeitsprachen (Ada, PEARL, PORTAL) wie auf Assemblerniveau in den Grundzügen diskutiert. Abschließend wird die Anwendung von Echtzeitsprachen am Beispiel von PORTAL für Automatisierungsaufgaben (z. B. Abtastregelung, Steuerung einer Modelleisenbahn) bis hin zu Protokollen von Programmläufen aufgezeigt.

Für ein umfassendes Verständnis des Buches ist sicher die gleichzeitige Arbeit an einem passenden Rechnersystem außerordentlich wünschenswert, denn für einen „Trockenkurs" ist die Darstellung oft recht knapp. Entgegen den Aussagen im Vorwort sind daher „Anfänger" bestimmt überfordert. Allerdings wird genügend ergänzende Literatur zitiert, die das vertiefende Verständnis ermöglicht. Mit dieser kleinen Einschränkung leistet das Buch aber genau das, was es wollte: den Automatisierungstechniker zum Umgang mit dem modernen Automatisierungshilfsmittel Computer zu befähigen.

B 2197 *D. Werner*

Analyse und Synthese von Systemen zur automatisierten Steuerung mit Hilfe von EDV-Anlagen. Von *V. E. Bolnokin* und *P. I. Cinaev.* Moskau: Radio i svjaz' 1986. 248 Seiten, 25 Bilder, 2 Tafeln.

Mit der Entwicklung rechnergestützter Arbeitsplätze für unterschiedliche Aufgabenbereiche erlangen mathematische Methoden zur Analyse und Synthese komplizierter Systeme an Bedeutung. Es existiert bereits eine Vielzahl von Algorithmen und Programmen. Unbefriedigend ist jedoch, daß bislang methodologische Materialien fehlen, die die Spezialisten befähigen, geeignete Verfahren auszuwählen und bei der Problemlösung sicher anzuwenden sowie die erhaltenen Ergebnisse zu interpretieren. Das Buch soll diese Lücke schließen und zur Anwendung des modernen mathematischen Instrumentariums auf EDV-Anlagen befähigen. Entsprechend diesem Anliegen ist das Buch durchgängig in eine kurze theoretische und methodologische Darlegung, eine Beschreibung der Algorithmen und Programme sowie in die Anwendung der vorgeschlagenen Algorithmen gegliedert. Zu allen Algorithmen werden PL/1-Programme, die für OSEC (4.1 bzw. 6.1) lauffähig sind, angegeben. Im einzelnen sind folgende Algorithmen und Programme enthalten:

- Stabilitätsanalyse (nach *Hurwitz, Routh, Michajlov*)
- Berechnung von Erwartungswert und Dispersion der Ausgangsgröße eines linearen Systems mit Hilfe von Faltungsintegral bzw. -summe
- optimale Steuerung nichtlinearer Systeme
- Analyse und Synthese digitaler Regler für Systeme mit diskreter Zeit
- Identifikation linearer dynamischer Systeme
- diskrete Kalman-Filter
- verschiedene Suchverfahren.

B 2229 *J.-A. Müller*

KURZFASSUNGEN

Fischer, J.; Wilfert, H.-H.:

Probleme und Methoden bei der Anwendung von Stackelberg-Strategien zur Steuerung komplexer Systeme mit hierarchischer Entscheidungsstruktur (Teil 1)

msr, Berlin 30 (1987) 8, S. 338–340

Im Beitrag werden die prinzipiellen Nutzungsmöglichkeiten von Stackelberg-Strategien zur Steuerung komplexer technischer Systeme mit hierarchischer Entscheidungsstruktur betrachtet. Herausgestellt wird dabei die Realitätsbezogenheit des Stackelberg-Modells und die damit im Vergleich zum Nash-Konzept erreichbaren verbesserten Werte der Steuerungskriterien. Der Beitrag analysiert alternative Lösungswege, die infolge der Schwierigkeiten in der direkten Bestimmung von Stackelberg-Strategien unter Closed-loop-Informationsstrukturen entwickelt wurden. Dem Entwicklungsstand der Theorie werden publizierte Anwendungsbeispiele gegenübergestellt und die Notwendigkeit zukünftiger praxisrelevanter Pilotbeispiele begründet.

Uhlig, J.:

Verallgemeinerte Prädiktorregelung für Totzeitsysteme mit aperiodischem Einschwingverhalten — Anforderungen an die Prozeßmodellierung

msr, Berlin 30 (1987) 8, S. 341–343

Für Systeme mit wesentlichen Totzeiten wird eine auf dem Prinzip der Vorhersage durch ein inneres Modell beruhende Regelung vorgestellt, die für stabile Prozesse mit aperiodischem Einschwingverhalten geeignet ist, eine große Robustheit gegenüber Modellfehlern hat und keine einschneidenden Forderungen an Struktur oder Linearität des Prozesses stellt. Die bei fehlerhaften Modellen auftretende Gefahr der Instabilität wird durch Einführung einer situationsabhängigen Unempfindlichkeit überwunden.

Bretthauer, G.; Römer, S.:

Programmpaket zur Identifikation rückgekoppelter Mehrgrößensysteme im Frequenzbereich auf den Kleinrechnern K 1630 und SM4-20

msr, Berlin 30 (1987) 8, S. 348–353

Vorgestellt wird ein Programmpaket zur Identifikation von Mehrgrößenregelkreisen, das nichtparametrische Frequenzgangmodelle für die unbekannte Mehrgrößenregelstrecke ermittelt. Das Programmpaket ist in der Programmiersprache PASCAL geschrieben und auf den Kleinrechnern K 1630 sowie SM4-20 implementiert. Es gestattet die Ermittlung der diskreten Werte der Frequenzgangmatrix $G_S(j\omega_l)$ nach der indirekten Methode, der direkten Methode, der Korrelationsmethode und der Verbundprozeßmethode.

Pönigk, D.; Schötz, H.-P.:

Interaktives Mikrorechnerprogrammsystem für Echtzeitidentifikationsaufgaben

msr, Berlin 30 (1987) 8, S. 358–361

Für die experimentelle Identifikation von zeitinvarianten und zeitvarianten Prozessen wurde ein Programmsystem auf dem Bürocomputer A 5120 implementiert. Es enthält sieben rekursive Parameterschätzverfahren und ein Testsignalentwicklungssystem sowie die entsprechenden Routinen für Dialogbetrieb, Simulationsuntersuchungen und grafische und numerische Meßwertausgabe. Als externe Testsignale stehen bis zu 18 Signalfolgen zur Verfügung.

Buchta, H.:

Zweistufiges Verfahren zur Identifikation linearer dynamischer Systeme vom SISO-Typ für kurzperiodische Testfolgen

msr, Berlin 30 (1987) 8, S. 362–366

Ein zweistufiges Verfahren zur Identifikation einvariabler, zeitinvarianter, linearer dynamischer Systeme unter Verwendung kurzperiodischer Testfolgen wird algorithmisch als CAD-Mittel aufbereitet. In einer ersten Stufe werden pseudoparametrische Modelle, die mit Gewichtsfolgemodellen verwandt sind, gewonnen. Diese Modelle werden in der zweiten Stufe parametrisiert und daraus z-Übertragungsfunktionsmodelle abgeleitet. Statistische Eigenschaften der Schätzungen werden formuliert.

Döschner, Ch.; Knorr, J.:

Eine Variante der Identifikation multivariabler Systeme im geschlossenen Regelkreis unter Nutzung der Strukturinformation

msr, Berlin 30 (1987) 8, S. 367–369

Im Beitrag wird ein Verfahren zur Identifikation multivariabler Systeme im geschlossenen Kreis vorgestellt. Dieses Verfahren basiert auf der Nutzung der durch die theoretische Analyse gewonnenen Strukturinformation zur Parameterschätzung. Neben der Ermittlung notwendiger Strukturvorgaben für die Schätzungen werden damit gleichzeitig günstige Bedingungen für die Echtzeitverarbeitung geschaffen. Das Vorgehen wird an einem Beispiel erläutert. Ergebnisse eines simulativen Tests werden vorgestellt.

Götze, W.; Müller, J.-A.:

Analyse und Vorhersage des monatlichen Elektroenergiebedarfs im VE Fischhandel Berlin

msr, Berlin 30 (1987) 8, S. 373–375

Die wichtige betriebswirtschaftliche Aufgabe der Analyse und Vorhersage des monatlichen Elektroenergiebedarfs im VE Fischhandel Berlin kann mit mathematisch-statistischen Verfahren gelöst werden. Dialogorientierte Modellwahlverfahren nach dem ARIMA-Konzept oder rechnergestützten Verfahren können nach dem Prinzip der Selbstorganisation oder mit Hilfe von Modellauswahlkriterien verwendet werden. A-priori-Informationen über die Vorhersageaufgabe wirken sich auf Robustheit und Treffsicherheit zahlreicher Modelle aus. Um diesen Effekt noch stärker auszunutzen, sind qualitative Veränderungen in die Technologie der Zeitreihenanalyse und Vorhersage einzubringen.

РЕЗЮМЕ

Fischer, J.; Wilfert, H.-H.:

Проблемы и методы при применении стратегий Стакельберга для управления комплексными системами с иерархической структурой решений (Часть 1)

msr, Berlin 30 (1987) 8, стр. 338–340

В статье рассмотрены принципиальные возможности использования стратегий Стакельберга для управления комплексными техническими системами с иерархической структурой решений. При этом отмечены отнесенность реальности модели Стакельберга и улучшенные значения критериев управления, достигаемые по сравнению с Nash-концептом. Статья анализирует альтернативные пути решения, которые были разработаны в рамках информационных структур замкнутого цикла в результате трудностей при непосредственном определении стратегий Стакельберга. Ход разработки теории сравнен с опубликованными примерами применения и обоснована необходимость будущих пилотных примеров, значащих для практики.

Uhlig, J.:

Обобщенное регулирование предиктора для систем мертвого времени с апериодическим поведением переходной характеристики — требования к моделированию процессов

msr, Berlin 30 (1987) 8, стр. 341–343

Для систем со значительными мертвыми временами представлено регулирование, основанное на принципе предсказания внутренней моделью, которое пригодно для устойчивых процессов с апериодическим поведением переходной характеристики, имеет большую силу к ошибкам модели и не выдвигает никаких жестких требований к структуре или линейности процесса. Опасность неустойчивости, появляющаяся при ошибочных моделях, преодолена введением нечувствительности в зависимости от ситуации.

Bretthauer, G.; Römer, S.:

Пакет для идентификации систем нескольких величин с обратной связью в частотном диапазоне на мини-ЭВМ К 1630 и СМ4-20

msr, Berlin 30 (1987) 8, стр. 348–353

Представлен пакет для идентификации контуров регулирования с несколькими величинами, который для неизвестных объектов регулирования с несколькими величинами определяет непараметрические модели частотной характеристики. Пакет описан на языке программирования ПАСКАЛ и имплементирован на мини-ЭВМ К 1630 и СМ4-20. Он позволяет определение дискретных значений матрицы частотной характеристики $G_S(j\omega_l)$ по косвенному методу, по непосредственному методу, по методу корреляции и по методу составного процесса.

Pönigk, D.; Schötz, H.-P.:

Интерактивная микровычислительная программная система для задач идентификации в реальном масштабе времени

msr, Berlin 30 (1987) 8, стр. 358–361

Для экспериментальной идентификации процессов, инвариантных и вариантных по времени имплементирована программная система на конторской ЭВМ А 5120. Она содержит семь рекурсивных методов оценки параметров и систему разработки тест-сигналов, а также соответствующие стандартные программы для диалогового режима, исследования моделирования, а также графическую и числовую выдачу измеряемых значений. Как внешние тест-сигналы имеются до 18 последовательностей сигналов.

Buchta, H.:

Двухступенчатый метод для идентификации линейных динамических систем типа SISO для последовательностей краткопериодических тестов

msr, Berlin 30 (1987) 8, стр. 362–366

Двухступенчатый метод для идентификации однопеременных, инвариантных по времени, линейных динамических систем при применении последовательностей краткопериодических тестов алгоритмически подготовлен как средство САПР. На первой ступени получены псевдопараметрические модели, родственные с моделями последовательности веса. Эти модели параметризированы на второй ступени, и из этого выведены модели функции передачи z. Сформулированы статистические свойства оценок.

Döschner, Ch.; Knorr, J.:

Вариант идентификации мультипеременных систем в замкнутой цепи регулирования при применении структурной информации

msr, Berlin 30 (1987) 8, стр. 367–369

В статьте представлен метод для идентификации мультипеременных систем в замкнутой цепи. Этот метод основан на использовании структурной информации для оценки параметров, полученной путем теоретического анализа. Наряду с определением необходимых заданий структуры для оценок этим одновременно созданы благоприятствующие условия обработки в реальном масштабе времени. Действие пояснено на примере. Представлены результаты симулятивного теста.

Götze, W.; Müller, J.-A.:

Анализ и предсказание месячной потребности в электроэнергии в области народной рыбной торговли г. Берлин

msr, Berlin 30 (1987) 8, стр. 373–375

Важная организационно-производственная задача анализа и предсказания месячной потребности в электроэнергии в области народной рыбной торговли г. Берлин может быть решена при помощи математических статистических методов. Диалогоориентированные методы выбора модели по концепту АРИМА или по методам при применении ЭВМ могут быть использованы по принципу самоорганизации или с помощью критериев выбора модели. А-приори-информации о задаче предсказания влияют на жесткость и надежность попадания многих моделей. С целью более широкого использования данного эффекта внести качественные изменения в технологию анализа рядов времени и предсказания.

SUMMARIES

Fischer, J.; Wilfert, H.-H.:

Problems and Methods in Applying Stackelberg Strategies for Controlling Complex Systems with Hierarchical Decision Structure (Part 1)

msr, Berlin 30 (1987) 8, pp. 338–340

The authors consider the basic possibilities for using Stackelberg strategies in the control of complex technical systems with hierarchical decision structure. They point out that the Stackelberg model is closely related to reality, thus improved values of the control criteria being obtainable in comparison with the Nash concept. The contribution analyses alternative approaches developed due to the difficulties in the direct determination of Stackelberg strategies under closed-loop information structures. Published application examples are confronted with the state of theory and the necessity of future practice-oriented pilot examples is founded.

Uhlig, J.:

Generalized Predictor Feedback Control for Dead-Time Systems with Aperiodic Response — Requirements for Process Modelling

msr, Berlin 30 (1987) 8, pp. 341–343

For systems containing essential dead-times the author presents a feedback control based upon the principle of the prediction by an internal model, suited for stable processes with aperiodic response, being robust against model errors and having no hard requirements as to the structure and linearity of the process. The risk of instability due to model errors is eliminated by introducing an insensitivity depending on the situation.

Bretthauer, G.; Römer, S.:

Program Package for the Identification of Multivariable Feedback Systems in the Frequency Domain on the Minicomputers K 1630 and SM4-20

msr, Berlin 30 (1987) 8, pp. 348–353

For the identification of multivariable feedback control systems the authors present a program package determining non parametric frequency domain models for the unknown multivariable plant. The program package is written in the programming language PASCAL and implemented on the minicomputers K 1630 and SM4-20. It allows the determination of the discrete values of the frequency response matrix $G_S(j\omega_l)$ according to the indirect method, direct method, correlation method and the compound process method.

Pönigk, D.; Schötz, H.-P.:

Interactive Microcomputer Program System for Real-Time Identification Problems

msr, Berlin 30 (1987) 8, pp. 358–361

For the experimental identification of time-invariant and time-variable processes the authors implemented a program system on the office computer A 5120. It contains seven recursive parameter estimation methods and a test signal development system as well as the corresponding routines for dialog operation, simulation studies, graphical and numerical measurement value output. Up to 18 signal sequences are available as external test signals.

Buchta, H.:

Two-Step Identification Method for Linear Dynamic SISO Systems Using Short Period Test Sequences

msr, Berlin 30 (1987) 8, pp. 362–366

A two-step method for identifying single-variable time-invariant linear dynamic systems by means of short period test sequences is algorithmically prepared to provide a CAD tool. In the first step pseudo-parametric models related to weighting sequence models are obtained. In the second step these models are parametrized and then the z transfer function models are derived from them. Statistical characteristics of the estimations are formulated.

Döschner, Ch.; Knorr, J.:

A Variant of Multivariable System Identification in the Closed Control Loop by Use of the Structural Information

msr, Berlin 30 (1987) 8, pp. 367–369

The authors present a method for the identification of multivariable systems in the closed control loop. This method uses for parameter estimation the structural information obtained from theoretical analysis. Besides the determination of the necessary structural data for the estimations advantageous conditions for real-time processing are created. The approach is explained by means of an example, results of a simulation test being presented.

Götze, W.; Müller, J.-A.:

Analysis and Prediction of the Monthly Demand for Electrical Energy in the VE Fischhandel Berlin

msr, Berlin 30 (1987) 8, pp. 373–375

The important management problem of the analysis and prediction of the monthly demand for electrical energy in the VE Fischhandel Berlin can be solved by mathematical statistical methods. Dialog-oriented model selection methods based on the ARIMA concept or computer-aided methods may be used according to the principle of the self-organization or by means of model selection criteria. For many models a priori information on the prediction problem is advantageous as to robustness and accuracy. In order to exploit this effect completely qualitative changes are necessary in the technology of time series analysis and prediction.

RÉSUMÉS

Fischer, J.; Wilfert, H.-.H.:

Des problèmes et méthodes dans l'emploi des stratégies de Stackelberg pour la commande des systèmes complexes à structure hiérarchique de décision (Partie 1)

msr, Berlin 30 (1987) 8, pp. 338–340

Les auteurs considèrent les possibilités fondamentales pour l'emploi des stratégies de Stackelberg dans la commande des systèmes techniques complexes à structure hiérarchique de décision. Ils soulignent que le modèle de Stackelberg a une relation étroite à la réalité et que des valeurs améliorées des critères de commande sont obtenables en comparaison avec le concept de Nash. La contribution analyse des solutions alternatives développées en conséquences des difficultés dans la détermination directe des stratégies de Stackelberg sous structures d'information en boucle fermée. Des exemples d'emploi publiés sont comparés avec l'état de la théorie et la nécessité de futurs exemples pilotes rapportés à la pratique est fondée.

Uhlig, J.:

Un réglage prédicteur généralisé pour les systèmes à temps mort avec réponse apériodique — des exigences pour la modélisation de processus

msr, Berlin 30 (1987) 8, pp. 341–343

Pour les systèmes contenant des temps morts essentiels, l'auteur présente un réglage qui est basé sur le principe de la prédiction par un modèle interne, apte pour les processus stables à réponse apériodique, montre une grande robustesse contre des erreurs de modèle et ne pose pas des exigences sévères quant à la structure et la linéarité du processus. Le danger de l'instabilité qui apparaît en cas d'erreurs de modèle est éliminé par l'introduction d'une insensibilité dépendant de la situation.

Bretthauer, G.; Römer, S.:

Un paquet de programmes pour l'identification des systèmes à retour multidimensionnels dans le domaine fréquentiel sur les mini-ordinateurs K 1630 et SM4-20

msr, Berlin 30 (1987) 8, pp. 348–353

Pour l'identification des systèmes de réglage multidimensionnels, les auteurs présentent un paquet de programmes déterminant des modèles fréquentiels non paramétriques de l'objet à asservir multidimensionnel inconnu. Le paquet de programmes est écrit dans le langage de programmation PASCAL et implanté sur les mini-ordinateurs K 1630 et SM4-20. Il permet de déterminer les valeurs discrètes de la matrice de réponse fréquentielle $G_S(j\omega_l)$ selon les méthodes indirecte, directe, de corrélation et du processus composé.

Pönigk, D.; Schötz, H.-P.:

Un système interactif de programmes de micro-ordinateur pour les problèmes d'identification en temps réel

msr, Berlin 30 (1987) 8, pp. 358–361

Pour l'identification expérimentale des processus invariants et variables en temps, les auteurs ont implanté un système de programmes sur l'ordinateur de bureau A 5120. Il contient sept méthodes d'estimation paramétrique récursives et un système pour le développement de signaux de test ainsi que les routines pour l'opération de dialogue, les études de simulation et les sorties de valeur de mesure graphique et numérique. Jusqu'à 18 séquences de signal sont disponibles comme signaux de test externes.

Buchta, H.:

Une méthode en deux pas pour l'identification des systèmes dynamiques linéaires monovariables par séquences de test à periodes courtes

msr, Berlin 30 (1987) 8, pp. 362–366

Une méthode en deux pas pour l'identification des systèmes dynamiques linéaires monovariables à l'aide de séquences de test à périodes courtes est préparée algorithmiquement pour former un outil de CAO. Dans le premier pas, des modèles pseudo-paramétriques qui sont similaires aux modèles de séquence pondérée sont obtenus. Dans le deuxième pas, ces modèles sont paramétrés pour en dériver les modèles de fonction de transfert en z. Les caractéristiques statistiques des estimations sont formulées.

Döschner, Ch.; Knorr, J.:

Une variante de l'identification des systèmes multivariables en boucle fermée par l'usage de l'information structurale

msr, Berlin 30 (1987) 8, pp. 367–369

Les auteurs présentent une méthode pour l'identification des systèmes multivariables en boucle fermée. Cette méthode utilise, pour l'estimation paramétrique, l'information structurale obtenue à partir de l'analyse théorique. Outre la détermination des données structurales nécessaires, des conditions avantageuses pour le traitement en temps réel sont créées. La méthode est expliquée à l'aide d'un exemple. Les résultats d'un test par simulation sonst présentés.

Götze, W.; Müller, J.-A.:

L'analyse et la prédiction du besoin mensuel de l'énergie électrique dans le VE Fischhandel Berlin

msr, Berlin 30 (1987) 8, pp. 373–375

Le problème économique important de l'analyse et de la prédiction du besoin mensuel de l'énergie électrique dans le VE Fischhandel Berlin peut être résolu par des méthodes mathématiques statistiques. Des méthodes de sélection de modèle orientées sur dialogue selon le concept ARIMA ou des méthodes assistées par ordinateur peuvent être utilisées selon le principe de l'auto-organisation ou par l'aide de critères de sélection de modèle. Pour beaucoup de modèles, des informations à priori sont avantageuses quant à la robustesse et précision. Pour utiliser cet effet plus complètement, des changements qualitatifs dans la technologie de l'analyse des séries chronologiques et de la prédiction sont nécessaires.

msr NEUE BÜCHER AUS DER UDSSR

Hierbei handelt es sich um neue Titel aus der UdSSR, die dem sowjetischen Neuerscheinungsdienst „Novye knigi" entnommen sind. Die Bücher können über den Volksbuchhandel bestellt werden.

[1] *Potemkin, I.*: Funkcional'nye uzly cifrovoj avtomatiki (Funktionskernstücke digitaler Automatik). Energoatomizdat. 1. Quart. 1988. NK 87–10 (277).
[2] *Boon, K.*: Paskal' dlja vsech (Pascal für alle). Energoatomizdat 2. Quart. 1988. NK 87–10 (278).
[3] *Bureev, L.; Dudko, A.; Zacharov, V.*: Prostejšaja mikro EVM (Einfachste Mikrorechner). Energoatomizdat. 3. Quart. 1988. NK 87–10 (279).
[4] *Očin, E.*: Vyčislitel'nye sistemy obrabotki izobraženija (Rechentechnische Systeme zur Verarbeitung von Abbildungen). Energoatomizdat. 3. Quart. 1988. NK 87–10 (281).
[5] *Kagan, B.; Mkrtumjan, J.*: Osnovy ekspluatacii EVM (Grundlagen des Betriebs von EDVA). Energoatomizdat. 3. Quart. 1987 NK 87–10 (460).
[6] Programmirovanie, otladka i rešenie zadač na EVM edinoj serii (Programmierung, Testung und Lösung von Aufgaben auf der EDVA der ESER-Reihe). Energoatomizdat. 2. Quart 1988. NK 87–10 (470).
[7] Programmirovanie, otladka i rešenie zadač na EVM edinoj serii. Jazyk FORTRAN (Programmierung, Testung und Lösung von Aufgaben auf ES EDVA. FORTRAN). Energoatomizdat. 1. Quart. 1988. NK 87–10 (471).
[8] *Sabinin, Ju.*: Elektromašinnye ustrojstva avtomatiki (Elektromaschinelle Anlagen der Automatik). Energoatomizdat. 1. Quart. 1988. NK 87–10 (472).
[9] *Titova, G.*: Sbornik proizvodstvennych situacij i delovych igr (Sammelband von Produktionssituationen und Planspielen). Chimija. 3. Quart. 1988. NK 87–10 (476).
[10] *Burdenkov, G.; Malyšev, A.*: Avtomatika, telemechanika i peredača dannych v energosistemach (Automatik, Fernwirktechnik und Datenübertragung in Energiesystemen). Energoatomizdat. 4. Quart. 1988. NK 87–10 (485).
[11] Dialektika poznanija složnych sistem (Dialektik der Erkennung komplizierter Systeme). Mysl'. 1. Quart. 1988. NK 87–11 (19).
[12] ANALITIK (čislenno-analitičeskoe rešenie zadač na malych EVM) (ANALYTIK (numerisch-analytische Lösung von Aufgaben auf Kleinrechner)). Naukova dumka (USSR). 4. Quart. 1987. NK 87–11 (151).
[13] *Šostak, V.; Geršanik, V.*: Imitacionnoe modelirovanie sudovych energetičeskich ustanovok (Simulation von Schiffsenergieeinrichtungen). Sudostroenie. 2. Quart. 1988. NK 87–11 (226).
[14] *Mirkin, B.*: Optimizacija dinamičeskich sistem s decentralizovannoj strukturoj upravlenija (Optimierung dynamischer Systeme mit dezentralisierter Steuerstruktur). Ilim (Kirg-SSR). 3. Quart. 1987. NK 87–1 (24).
[15] *Volkov, A.*: Geologičeskoe kartirovanie neftegazonosnych territorij s pomošč'ju EVM (Geologische Kartierung erdgastragender Gebiete mit Hilfe der EDVA). Nedra. 3. Quart. 1988. NK 87–1 (48).
[16] Metody geochimičeskogo modelirovanija i prognozirovanija v gidrogeologii (Methoden der geochemischen Modellierung und Vorhersage in der Hydrogeologie). Nedra. 3. Quart. 1988. NK 87–1 (76).
[17] *Rožnov, V.*: Električeskie sistemy regulirovanija na gidrovanija na gidrotechničeskich sooruženijach (Elektrische Regelungssysteme in hydrotechnischen Einrichtungen). Ilim (Kirg-SSR). 2. Quart. 1987. NK 87–1 (123).
[18] *Peregudov, M.; Chalamajzer, A.*: Bok o bok s komp'juterom (Seite an Seite mit dem Computer). Vysš. škola. 2. Quart. 1987. NK 87–1 (124).
[19] Matematičeskoe modelirovanie technologičeskich ob'ektov magistral'nogo transporta gaza (Mathematische Modellierung technologischer Objekte des Magistralen Gastransports). Nedra. 4. Quart. 1988. NK 87–1 (226).
[20] *Solomatin, N.*: Logičeskie elementy EVM (Logische Elemente der EDVA). Vysš. škola. 1. Quart. 1987. NK 87–1 (296).
[21] *Kiriličev, A.*: Osnovy vyčislitel'noj techniki (Grundlagen der Rechentechnik). Nedra. 1. Quart. 1988. NK 87–1 (312).
[22] EVM v sovremennoj nauke (EDVA in der modernen Wissenschaft). Nauka. 4. Quart. 1987. NK 87–1 (324).
[23] *Matusevič, A.*: Ob'emnoe modelirovanie geologičeskich ob'ektov na EVM (Volumen-Modellierung geologischer Objekte auf der EDVA). Nedra. 3. Quart. 1988. NK 87–2 (12).
[24] *Brezgunov, N.*: Osnovy sistemnogo analiza poiskovych rabot (Grundlagen der Systemanalyse von Sucharbeiten). Nedra. 1. Quart. 1988. NK 87–2 (18).
[25] *Dobrynin, V.; Čeremisina, E.*: Matematičeskie metody i metody vyčislitel'noj techniki v geologoprognoznych issledovanijach (Mathematische Methoden und Methoden der Rechentechnik in geologischen Vorhersageuntersuchungen). Nedra. 4. Quart. 1988. NK 87–2 (20).
[26] *Marčenko, V.*: Čeloveko-mašinnye metody geologičeskogo prognozirovanija (Dialogmethoden in geologischen Vorhersagemethoden). Nedra. 2. Quart. 1988. NK 87–2 (25).
[27] *Aliev, R.; Liberzon, M.*: Metody i algoritmy koordinacii v promyšlennych sistemach upravlenija (Methoden und Algorithmen zur Koordinierung in industriellen Steuerungssystemen). Radio i svjaz'. 3. Quart. 1987. NK 87–4 (44).
[28] *Lju Jučžen, Gibson, G.*: Mikroprocessory semejstva 8086/8088 (Mikroprozessoren der Familie 8086/8088. Übers. aus dem Engl.). Radio i svjaz'. 4. Quart. 1987. NK 87–4 (45).
[29] *Partin, A.*: Vvedenie v cifrovyju techniku (Einführung in die digitale Technik). Radio i svjaz'. 4. Quart. 1987. NK 87–4 (60).
[30] *Ivanovskij, A.*: Vek robototechniki (Das Jahrhundert der Robotertechnik). Vyšejsaja škola (BSSR). 4. Quart. 1988.
[31] *Egil'skij, I.*: Avtomatizirovannye sistemy upravlenija technologičeskimi processami podači i raspredelenija vody (Automatisierte Steuerungssysteme für technologische Prozesse der Wasserversorgung und -verteilung). Strojizdat. 4. Quart. 1988. NK 87–4 (200).
[32] *Stenjaev, V.; Danil'čenko, Ju.*: EVM v upravlenii gostiničnym chozjajstvom (EDVA in der Steuerung von Gaststätten). Strojizdat. 3. Quart. 1988. NK 87–4 (211). msr 8714

messen · steuern · regeln

Herausgeber: Kammer der Technik, Wissenschaftlich-Technische Gesellschaft für Meß- und Automatisierungstechnik (WGMA)

Verlag: VEB Verlag Technik, Oranienburger Str. 13/14, PSF 201, Berlin, DDR-1020, Telegrammadresse: Technikverlag Berlin; Telefon: 28700; Telex: 0112228 techn dd

Verlagsdirektor: Dipl.-Ing. *Klaus Hieronimus*

Redaktion: Dr.-Ing. *Dietrich Werner*, Verantwortlicher Redakteur (Telefon: 2870362)
Dr.-Ing. *Jürgen Wede*, Redakteur (Telefon: 2870374)

Gestaltung: *Karen Wohlgemuth* (Telefon: 2870288)

Lizenz-Nr.: 1112 des Presseamtes beim Vorsitzenden des Ministerrates der Deutschen Demokratischen Republik

AN (EDV): 15936

Erscheinungsweise: monatlich 1 Heft

Heftpreis: 4,— M, Abonnementpreis vierteljährlich 12,— M; Auslandspreise sind den Zeitschriftenkatalogen des Außenhandelsbetriebs BUCHEXPORT zu entnehmen.

Gesamtherstellung: VEB Druckerei „Thomas Müntzer", Bad Langensalza, 5820

Anzeigenannahme: Für Bevölkerungsanzeigen alle Anzeigen-Annahmestellen in der DDR, für Wirtschaftsanzeigen der VEB Verlag Technik, Oranienburger Str. 13/14, PSF 201, Berlin, 1020. Anzeigenpreisliste Nr. 7; Auslandsanzeigen: Interwerbung GmbH, Hermann-Duncker-Str. 89, Berlin, DDR-1157

Erfüllungsort und Gerichtsstand: Berlin-Mitte. Der Verlag behält sich alle Rechte an den von ihm veröffentlichten Aufsätzen und Abbildungen, auch das der Übersetzung in andere Sprachen vor. Auszüge, Referate und Besprechungen sind nur mit voller Quellenangabe zulässig.

Bezugsmöglichkeiten:

DDR: sämtliche Postämter

SVR Albanien: Direktorije Quendrore e Perhapjes dhe Propaganditit te Librit Rruga Konference e Pezes, Tirana

VR Bulgarien: Direkzia R.E.P., 11a, Rue Paris, Sofia

VR China: China National Publications Import and Export Corporation, West Europe Department, P.O. Box 88, Beijing

ČSSR: PNS — Ústřední Expedícia a Dovoz Tisku Praha, Slezska 11, 12000 Praha 2; PNS, Ústredná Expedícia a Dovoz Tlače, Posta 022 88547 Bratislava

SFR Jugoslawien: Jugoslovenska Knjiga, Terazije 27, Beograd; Izdavačko Knjižarsko Produzeče MLADOST, Ilica 30, Zagreb

Koreanische DVR: CHULPANMUL Korea Publications Export & Import Corporation, Pyongyang

Republik Kuba: Empresa de Comercio Exterior de Publicaciones, O'Reilly No. 407, Ciudad Habana

VR Polen: C.K.P. i.W. Ruch, Towarowa 28, 00-958 Warszawa

SR Rumänien: D.E.P. Bucureşti, Piaţa Scienteii, Bucureşti

UdSSR: Städtische Abteilungen von Sojuzpečat oder Postämter und Postkontore

Ungarische VR: P.K.H.I., Külföldi Előfizetési Osztály, P.O. Box 16, 1426 Budapest

SR Vietnam: XUNHASABA, 32, Hai Ba Trung, Hanoi

BRD und Berlin (West): ESKABE Komissions-Grossobuchhandlung, Postfach 36, 8222 Ruhpolding/Obb.; Helios Literatur-Vertriebs-GmbH, Eichborndamm 141—167, Berlin (West) 52; Kunst und Wissen Erich Bieber OHG, Postfach 46, 7000 Stuttgart 1; Gebrüder Petermann, BUCH + ZEITUNG INTERNATIONAL, Kurfürstenstraße 111, Berlin (West) 30

Österreich: Helios Literatur-Vertriebs-GmbH & Co. KG, Industriestraße B 13, A-2345 Brunn am Gebirge

Schweiz: Verlagsauslieferung Wissenschaft der Freihofer AG, Weinbergstr. 109, 8033 Zürich

Alle anderen Länder: örtlicher Buchhandel; BUCHEXPORT Volkseigener Außenhandelsbetrieb der Deutschen Demokratischen Republik, Postfach 160, Leipzig, DDR-7010 und Leipzig Book Service, Talstraße 29, Leipzig, DDR-7010.

Abnahmebedingungen

Die Redaktion veröffentlicht nur solche Beiträge, die noch an keiner anderen Stelle des In- und Auslandes in dieser Form erschienen sind oder bis zur Veröffentlichung erscheinen werden und die die Verfasser bis zum Ablauf des ersten, dem Erscheinen folgenden vollen Kalenderjahres an keiner anderen Stelle veröffentlichen, ohne hierzu vorher die Zustimmung der Redaktion der Zeitschrift eingeholt zu haben. Mit der Abnahme und Veröffentlichung des Manuskriptes geht das ausschließliche Verlagsrecht für alle Sprachen und Länder auf den Verlag über. Es ist ohne ausdrückliche Genehmigung der Redaktion nicht gestattet, fotografische Vervielfältigungen, Mikrofilme u. a. von Heften der Zeitschrift, einzelnen Beiträgen oder von Teilen daraus herzustellen. Ferner behält sich die Redaktion Änderungsvorschläge nach der Durcharbeitung der Beiträge vor. Beiträge müssen eine Kopie der Veröffentlichungsfreigabe des Betriebes bzw. der Institution enthalten.
Richtlinien für die Manuskriptgestaltung sind dem Heft 1 (S. 28) messen · steuern · regeln 1987 zu entnehmen bzw. werden von der Redaktion auf Anfrage zugesandt. Die Einhaltung dieser Gesichtspunkte garantiert eine sofortige Bearbeitung und verzögerungsfreie Veröffentlichung der Arbeit in der Zeitschrift

16. Jahrestagung „Grundlagen der Modellierung und Simulationstechnik"

Der Fachausschuß „Modellierung" der Wissenschaftlich-Technischen Gesellschaft für Meß- und Automatisierungstechnik in der Kammer der Technik veranstaltet

vom 8. bis 10. Dezember 1987 in Rostock

die o. g. Tagung.

Thematische Schwerpunkte:

- Simulationsmethoden und -techniken
- Modellbildung und Simulation in der Biotechnologie
- Einsatz von Modellen und Simulationsmethoden für CAD/CAM im Maschinenbau
- Methoden der Modellaggregation.

Teilnahmewünsche sind bitte schriftlich zu richten an das

Präsidium der KDT
Sekretariat der WDMA
PSF 1315
Berlin
1086

33. IWK der TH Ilmenau

Die Technische Hochschule Ilmenau veranstaltet in der Zeit vom 24. bis 28. Oktober 1988 ihr 33. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium.
Es ist den Problemkreisen

- Technische und biomedizinische Kybernetik
- Mathematik, Rechentechnik und ökonomische Kybernetik

gewidmet.
Weitere Informationen über:

Technische Hochschule Ilmenau
Direktorat für Internationale Beziehungen
Vorbereitungskomitee 33. IWK
PSF 327
Ilmenau
6300
DDR

Frei strukturierbare Multifunktionseinheit

Mit der Multifunktionseinheit hat die Fa. *Siemens*/BRD das Programm der Teleperm-D-Regelgeräte für die Prozeßtechnik um ein frei strukturierbares Regel- und Rechengerät erweitert. Das Gerät beinhaltet eine Vielzahl von unterschiedlichen verfahrenstechnischen Funktionen wie PID-Regler, Stellungsregler, Zeitplangeber, Korrekturrechner, Integratoren sowie zahlreiche Arithmetik-, Logik-, Speicher-, Schalt-, Zähl- und Zeitfunktionen.
Die Multifunktionseinheit ist ein kompaktes Gerät, das je acht Analog- und Binäreingänge, drei Analog- und zwölf Binärausgänge sowie eine serielle Schnittstelle hat. Über die serielle Schnittstelle können die Einheiten mit dem Programm Sipart von Personalcomputern oder Prozeßrechnern aus zentral bedient und beobachtet werden.
Die Funktionseinheit ist mit 63 Grundfunktionsblöcken und 19 Komplexfunktionsblöcken ausgerüstet. Grundfunktionsblöcke können mit einer der 29 gespeicherten Funktionen aus der geräteinternen Funktionsbibliothek belegt werden. Komplexfunktionsblöcke, wie Regler, Zeitplangeber usw., bestehen aus fertig konfigurierten Standardfunktionen, die parametriert werden. Alle Funktionsblöcke lassen sich softwaremäßig untereinander sowie mit verschiedenen Ein- und Ausgängen frei verbinden.
Die Programmierung erfolgt bedienergeführt ohne Zusatzgeräte über die Gerätefront. Sämtliche Bedieneingaben beim Parametrieren und Strukturieren werden auf dem Display des Gerätes angezeigt. Programmiersprachenkenntnisse sind nicht erforderlich.
Die Anwenderprogramme sind netzausfallsicher in einem steckbaren Speicher Modul gespeichert, das leicht ausgewechselt werden kann. Die Multifunktionseinheit kann durch ihre zahlreichen integrierten Funktionen eine Vielzahl von Einzelgeräten ersetzen.

Preiswertes optisches Kontrollsystem

Die Fa. *Itran Corp.* aus Manchester/USA, hat ein optisches Kontrollsystem entwickelt, daß Umfang und Kosten von Inspektionseinrichtungen in leistungsfähigen Fertigungssystemen halbiert. Das System MVP 1000 ist modular aufgebaut und besteht aus einem Bildprozessor, einer transportablen Programmiereinrichtung, einer Kamera und einer parallelen Schnittstelle.
Kernstück ist ein Einplatinenrechner mit 0,5 Mbyte Arbeits- und 76 Kbyte Bildspeicher, auf dem bis zu 6 Standardprogramme gleichzeitig laufen können. Der Bildprozessor basiert auf einem Mikroprozessor Motorola 68010 und 29116-Bit-slice-Schaltkreisen. Er kann gleichzeitig mit 4 Kameras arbeiten. Verarbeitet werden 64 Graustufen. Die Erkennungsgeschwindigkeit hängt von der Komplexität des Gegenstandes ab und bewegt sich zwischen 60 Teilen je Sekunde und 1 Teil in 3 Sekunden. Die Bildauflösung beträgt 320 × 240 Punkte. Die Erkennung von Kantenmustern wird durch Schwankungen der Lichtintensität durch Schatten nicht gestört.
Die Programmierung kann von Nichtspezialisten direkt im Fertigungssystem durchgeführt werden.

Mobile Roboter in unebenem Gelände

Von der Fa. *Odetics*/USA wurde der mobile Roboter Odex I entwickelt, der Treppen steigt, sich ohne Vorkenntnisse in unebenem Gelände bewegt und auf Podeste mit 60 cm Durchmesser steigt, ohne das Gleichgewicht zu verlieren. Jedes der Gelenkbeine hebt bis zu 300 kg. Gehend transportiert der Roboter 760 kg bei einem Eigengewicht von 168 kg. Um Hindernisse zu überwinden, streckt er sich auf 198 cm Höhe, soll er beladen werden, macht er sich klein (91 cm).
Die verbesserte Version Odex II hat ein Kraft-Reflexionssystem in der Gelenkarmkonstruktion, mit dem er sich auch auf nachgebendem Boden sicher bewegen kann. Eine dreidimensionale Laser-Scanning-Technik mit einer Reichweite von derzeit noch 15 m erlaubt ihm autonomes Orientieren. Durch Expertensysteme soll die Navigation und Kontrolle noch verbessert werden. Gegenwärtig werden Ernte-, Nuklear- und Weltraumroboter entwickelt.

Polymertransistor als chemischer Sensor

Am MIT Cambridge/USA wurde ein Polymertransistor entwickelt, der auf chemische Signale reagiert. Das Material zwischen Drain und Source ist ein Polymer. Wie Halbleiter haben auch bestimmte Polymere eine variable Leitfähigkeit. Kommen sie mit bestimmten chemischen Verbindungen in Berührung, geben sie Elektronen ab oder nehmen welche auf. Reagiert das Polymer beispielsweise mit Sauerstoff, so nimmt jedes Sauerstoffmolekül 4 Elektronen vom Polymer auf. In dem neuen Bauelement wird das Polymer durch die Abwanderung dieser Elektronen leitfähiger. Für jedes der 4 je Sauerstoffmolekül abwandernden Elektronen fließen zahlreiche Elektronen von der Source- zur Drain-Elektrode, das ursprüngliche Signal wird verstärkt. Der Strom fließt so lange, wie Sauerstoff anwesend ist, und ist ein Maß für die Sauerstoffkonzentration. Es wird angenommen, daß der Polymertransistor als Sensor zur Überwachung der Konzentration von Sauerstoff, Kohlenmonoxid, Säuren oder bestimmter Enzyme eingesetzt werden kann. Auf lange Sicht verspricht dieser Transistor ein Bindeglied zwischen Biologie und Elektronik zu werden, da chemische Impulse, die für biologische Vorgänge typisch sind in elektrische Signale umgesetzt werden können.

ISSN 0026-0347, mess., steuern regel-
Berlin 30 (1987) 8, S